

Rapport de Stage

Évaluation des procédures de naturalisation pour la reconstitution de débits sur le bassin versant de la Seine

Morgane Terrier

Tuteur :
Charles Perrin (Irstea)

Tuteur académique :
Pierre Brigode (Polytech'Nice)

Septembre 2016

Polytech'Nice Sophia Antipolis
Département Génie de l'eau

930 Route des Colles,
06410 Biot

Site : <http://hydroinformatique.polytechnice.fr/>

Irstea Antony

Unité de recherche HBAN
1 Rue Pierre Gilles de Gennes,
92160 Antony

Site : <http://webgr.irstea.fr/>

Remerciements

Je tiens tous d'abord à exprimer toute ma gratitude à mon encadrant, Charles Perrin, pour m'avoir accueillie dans son équipe et offert l'opportunité de découvrir le monde de la recherche. Je remercie également tous les membres de l'équipe HBAN d'Antony que j'ai maintes fois sollicités et qui ont toujours été présents.

Je remercie l'ONEMA qui, grâce à son soutien financier, a permis la réalisation de ce stage. Je remercie également l'établissement public Seine Grands Lacs pour sa contribution en fournissant les données des lacs-réservoirs, Météo France pour les données climatiques et la banque HYDRO pour les données de débit fournies. Un grand merci à l'équipe FRESHCO d'Irstea Aix-en-Provence pour nous avoir fourni les données de températures des lacs-réservoirs de la Seine et à Monsieur Prats-Rodriguez pour ses conseils sur l'estimation de l'évaporation. Je remercie également Arnaud Belleville de EDF pour ses informations sur les procédures de naturalisation et leurs applications.

Et enfin je remercie toute l'équipe pédagogique de Polytech'Nice Sophia pour tout le savoir transmis et les compétences acquises au cours de ces dernières années.

Résumé

Les séries de débits observés au fil du temps comportent à la fois la trace des variations climatiques naturelles et des altérations hydrologiques dues aux activités humaines. Or, l'accès aux débits naturels s'avère aujourd'hui nécessaire afin d'optimiser la gestion de la ressource en eau ou encore pour le contrôle réglementaire des usages. Ainsi, depuis une vingtaine d'années, plusieurs méthodes de naturalisation, permettant de passer d'un débit influencé à un débit naturalisé, ont été développées pour des applications spécifiques, sans réelle estimation des incertitudes associées. Notre étude propose d'abord une analyse a priori des forces et faiblesses respectives ainsi que les domaines d'applicabilité des trois grandes familles de méthode identifiées. Puis, en considérant l'influence des quatre lacs-réservoirs sur le bassin versant de la Seine en amont de Paris, une comparaison de ces méthodes est effectuée sur un échantillon de stations hydrométriques. Les modèles hydrologiques étant essentiels à l'application de certaines méthodes, les modèles GR4J, GR5J et GR6J (implémentés dans la package airGR sous R), ainsi que des versions incluant les barrages-réservoirs, ont été appliqués dans notre étude. Les principaux résultats montrent qu'en étudiant l'impact des lacs-réservoirs avec les débits naturalisés par des méthodes différentes, nous arrivons à des analyses similaires. Cependant, quantifier l'impact réel reste délicat de par la différence qu'il existe sur les bas débits naturalisés notamment.

Mots-clés : naturalisation, influence anthropique, modélisation hydrologique, hydrologie, lacs-réservoirs, bassin de la Seine

Abstract

Observed streamflow time series are influenced by climate variations and human-induced perturbations. Nowadays, estimating the natural river flows appears essential in different fields, such as in water resources management or in the legislation context. In the last two decades, several naturalization methods have been developed for passing from an influenced to a naturalized streamflow series for specific applications, with no actual estimation of the associated uncertainties. Our study first analyzes the respective strengths, weaknesses and domains of applicability of three identified groups of methods. Then these methods were compared on the case study of the Seine River Basin by considering the influence of the four artificial reservoirs and focusing on some hydrometric stations. Since hydrological models are essential for the application of some naturalization methods, we used the GR4J, GR5J and GR6J models (implemented in the airGR R package), and their derived versions including reservoirs. The main results show that in studying the reservoirs impact with naturalized streamflow series, computed with different methods, comparable analyses are obtained. However, because of the difference natural low flow estimates, it still sensitive to quantify the actual impacts of reservoirs.

Key-words: natural streamflow, naturalization, human influence, hydrological modelling, Seine River Basin, artificial reservoirs

Sommaire

Remerciements	3
Résumé.....	5
Abstract	5
Sommaire	7
Table des figures.....	8
Table des tableaux.....	9
Introduction.....	11
1. Etat de l'art.....	13
1.1. Cadre de l'étude	14
1.2. Classification des méthodes	14
2. Bassin versant de la Seine	19
2.1. Choix du bassin	20
2.2. Régime hydrologique.....	20
2.3. Les lacs-réservoirs.....	21
2.4. Base de données.....	25
3. Modèles et méthodologie	29
3.1. Modèles utilisés	30
3.2. Formulation du bilan sur ouvrage	32
3.3. Choix des périodes d'analyse	32
3.4. Critères de calage et d'évaluation	33
3.5. Estimation d'un intervalle de confiance par la méthode QUOIQUE.....	34
3.6. Démarche d'évaluation	34
4. Résultats.....	37
4.1. Prérequis.....	38
4.2. Forces et faiblesses des méthodes testées	38
4.3. Comparaison des méthodes	44
Conclusion	55
Bibliographie	57
Annexes	59
Annexe 1 : Travaux utilisant la méthode de bilan sur ouvrage.	60
Annexe 2 : Travaux utilisant la méthode d'extension de série de débit ou de reconstitution de séries de débits. 62	62
Annexe 3 : Caractéristiques des lacs-réservoirs du bassin de la Seine.	64
Annexe 4 : Résultats des modèles GR sur le bassin amont de la Seine.	66
Annexe 5 : Résultats des modèles GR incluant les lacs-réservoirs sur le bassin amont de la Seine.....	67
Annexe 6 : Forces et faiblesses de la méthode de bilan sur ouvrage.	68
Annexe 7 : Forces et faiblesses de la méthode d'extension de séries de débits naturels.....	71
Annexe 8 : Régimes naturels simulés et régimes influencés de nos stations d'études sur la période [P3P4] . 72	72

Table des figures

Figure 1 : Schéma de naturalisation par la méthode de bilan sur ouvrage.....	15
Figure 2 : Schéma simplifié d'un modèle hydrologique avec influence anthropique.....	16
Figure 3 : Schéma simplifié d'un modèle hydrologique.....	16
Figure 4 : Carte du bassin versant amont de la Seine et de ses principaux affluents.....	20
Figure 5 : Hydrogramme de l'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010) avant et après la mise en service du réservoir en 1990 (trait rouge).....	21
Figure 6 : Variation mensuelle du volume du réservoir de l'Aube, du débit de prise et de restitution (période considérée : 1995 - 2006).....	22
Figure 7 : Carte du lac-réservoir de Pannecière.....	23
Figure 8 : Carte du lac-réservoir de la Seine.....	23
Figure 9 : Carte du lac-réservoir de l'Aube.....	24
Figure 10 : Carte du lac-réservoir de la Marne.....	24
Figure 11 : Carte des stations hydrométriques, sur le bassin amont de la Seine, influencées par les lacs-réservoirs.....	27
Figure 12 : Schéma du fonctionnement du modèle journalier GR4J.....	30
Figure 13 : Schéma du fonctionnement du modèle journalier GR4J avec inclusion des lacs-réservoirs.....	31
Figure 14 : Subdivision de la période d'étude.....	32
Figure 15 : Régime mensuel de l'erreur journalière sur les quatre lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]), a) en m ³ /s et b) en mm/j.....	39
Figure 16 : Régime mensuel de l'erreur journalière selon le choix du pas de temps (période : [P3P4]).....	39
Figure 17 : Régime mensuel de l'erreur journalière selon l'évaporation/évapotranspiration (période : [P3P4]).....	40
Figure 18 : Régime mensuel de l'erreur journalière selon la variation de la surface (période : [P3P4]).....	41
Figure 19 : Comparaison des débits naturalisés par la méthode de bilan sur ouvrage (Q_{sim}) par rapport aux débits naturalisés d'Hydratec ($Q_{réf}$) (période : [P3P4]), suivant quatre critères d'efficacité.....	42
Figure 20 : Comparaison des débits naturalisés par la méthode d'extensions de série de débit après calage sur P1 puis P2, par rapport aux débits naturalisés obtenus après calage sur [P1P2].....	43
Figure 21 : Quantiles 10% (U10) et 90% (U90) des erreurs multiplicatives obtenues grâce à la méthode QUOIQUE sur la station d'Arcis-sur-Aube avec le modèle GR4J sur la période [P1P2], en fonction du débit simulé.....	43
Figure 22 : KGE sur la racine carrée entre les différentes méthodes de naturalisation avec en abscisse le débit naturalisé de référence (période : [P3P4]).....	45
Figure 23 : R10 entre les différentes méthodes de naturalisation avec en abscisse le débit naturalisé de référence (période : [P3P4]).....	46
Figure 24 : R90 entre les différentes méthodes de naturalisation avec en abscisse le débit naturalisé de référence (période : [P3P4]).....	47
Figure 25 : KGE sur la racine carrée entre les débits naturalisés et les débits influencés de référence de la Banque HYDRO sur les stations du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).....	49
Figure 26 : R10 entre les débits naturalisés et les débits influencés de référence de la Banque HYDRO sur les stations du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).....	49
Figure 27 : R90 entre les débits naturalisés et les débits influencés de référence de la Banque HYDRO sur les stations du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).....	50
Figure 28 : Régime journalier interannuel de l'Aube à Blaincourt et de la Seine à Paris (période : [P3P4]).....	51
Figure 29 : KGE sur la racine carrée des débits obtenus par la méthode d'extension de séries de débits naturalisés avec GR5J (périodes : [P3,P4]).....	52
Figure 30 : Q10 des débits obtenus par la méthode d'extension de séries de débits naturalisés avec GR5J par rapport aux Q10 naturalisés par les différentes méthodes (périodes : [P3,P4]).....	52

Figure 31 : Q90 des débits obtenus par la méthode d'extension de séries de débits naturalisés avec GR5J par rapport aux Q90 naturalisés par les différentes méthodes (périodes : [P3,P4]).	53
Figure 32 : Quantité moyenne journalière d'eau mise en jeu au niveau des différents lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).	65
Figure 33 : Comparaison des débits naturels simulés par les modèles GR4J, GR5J et GR6J par rapport aux débits observés naturels de la Banque HYDRO sur l'Aube.	66
Figure 34 : Comparaison des débits influencés simulés par les modèles GR4J, GR5J et GR6J incluant les lacs-réservoirs par rapport aux débits observés influencés de la Banque HYDRO.	67
Figure 35 : Régime journalier de l'évaporation de Sill et de l'évapotranspiration d'Oudin sur les lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).	68
Figure 36 : Moyennes journalières de l'évapotranspiration d'Oudin, de l'évaporation de Sill et de l'évaporation réelle d'un bac Colorado sur le site du lac-réservoir de la Marne (période : 2009-2013).	69
Figure 37 : Evolution mensuelle de la surface des lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine.	69
Figure 38 : Régime journalier des précipitations et de l'évapotranspiration d'Oudin des lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine en prenant en compte leurs variations surfaciques (période : [P3P4]).	69
Figure 39 : Débits négatifs et erreur sur le bilan sur ouvrage aux stations de Blaincourt (Aube), d'Arcis-sur-Aube, de Châlons-sur-Marne et de Méry-sur-Seine (période : [P3P4]).	70
Figure 40 : Erreurs multiplicatives U10 et U90 obtenues grâce à la méthode QUOIQUE sur les stations de Blaincourt, Arcis-sur-Aube et Paris avec les modèles GR4J, GR5J et GR6J (période de référence : [P1P2]).	71
Figure 41 : Régimes interannuels naturalisés et régime influencé observé des stations amont du bassin versant de la Seine (période : [P3P4]).	73

Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des conditions d'utilisation des différentes méthodes de naturalisations.	18
Tableau 2 : Classement des stations hydrométriques selon l'indice distance-influence.	28
Tableau 3 : Taux de recouvrement obtenus sur les stations de Blaincourt, Arcis-sur-Aube et Paris par rapport aux intervalles de confiances obtenus avec GR4J, GR5J et GR6J sur la période [P3P4].	48
Tableau 4 : Caractéristiques des lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine.	64

Introduction

Actuellement la plupart des débits mesurés à l'embouchure des rivières comportent la trace des activités humaines. Ces activités modifient les volumes écoulés d'un point de vue quantitatif par des prélèvements et apports, ou par le transfert d'eau vers d'autres bassins. Il y a également un impact du point de vue temporel. Typiquement, la présence de barrages-réservoirs ou d'autres aménagements hydrauliques influence le débit du cours d'eau en aval, avec des effets tels que le soutien en période d'étiage ou l'écêtement des crues, entraînant une répartition différente des volumes d'eau à l'échelle de l'événement hydrologique ou de la saison.

Pouvoir établir le lien entre débits naturels et débits influencés est aujourd'hui un besoin dans plusieurs contextes :

- (1) D'un point de vu législatif : les débits de références, utilisés pour réglementer de nombreuses activités liées aux rivières, se basent sur le débit naturel des rivières.
- (2) Optimiser la gestion de la ressource en eau : la gestion de la ressource en eau peut se montrer complexe par le nombre d'influences et leurs interconnexions. Pouvoir passer d'un débit influencé à un débit naturel permet une meilleure gestion de l'eau et ainsi assurer le maintien d'un débit réservé (Dunn et al., 1999).
- (3) Evaluer à long terme les impacts du changement climatique : les débits observés comportant à la fois la trace des altérations hydrologiques dues aux activités humaines sur les bassins et aux changements climatiques, il est important de pouvoir les distinguer pour évaluer leurs impacts respectifs (Peters et al., 2001).
- (4) Evaluer l'impact anthropique et reconstruire des débits naturels pour des objectifs écologiques : l'intégrité écologique d'une rivière dépend de ses caractéristiques dynamiques naturelles, et donc a fortiori du débit naturel (Poff et al., 1997). Dans le cadre de renaturation des rivières, qui est l'un des objectifs de la Directive cadre sur l'eau, il s'avère nécessaire de pouvoir estimer le débit naturel des rivières. Plusieurs outils utilisant les débits naturalisés ont été mis en place pour évaluer l'altération des cours d'eau (De Girolamo et al., 2015).

Ces différents besoins ont conduit, depuis plus d'une vingtaine d'années, au développement de nombreuses méthodes de naturalisation des débits. L'objet de ce stage sera dans un premier temps d'identifier le domaine d'applicabilité de ces méthodes ainsi que leurs forces et faiblesses associées afin de mieux orienter leur utilisation. Puis dans un deuxième temps une évaluation indirecte des procédures sur le bassin versant de la Seine sera proposée. La complexité d'évaluer ces méthodes réside dans le fait que nous n'avons pas accès au débit naturel mais seulement au débit observé influencé. Un objectif complémentaire est donc d'amorcer la réflexion méthodologique sur les procédures d'évaluation de ces méthodes de naturalisation des débits.

1.

Etat de l'art

Dans cette première partie, nous allons présenter succinctement le cadre général de l'étude et les travaux existants sur la naturalisation des débits.

1.1. Cadre de l'étude

❖ Définition du débit naturel et débit influencé

De nombreuses activités anthropiques altèrent le cycle hydrologique naturel de l'eau, entraînant ainsi une modification du débit des cours d'eau. Ces débits modifiés par les activités humaines sont communément appelés débits influencés, par opposition au débit naturel. La définition du débit naturel reste cependant délicate, la présence de l'homme et la modification qu'il a faite de son environnement étant généralisées. De plus, certaines influences ont un rôle mineur sur l'hydrologie, dès lors que les quantités mises en jeu restent faibles par rapport aux volumes transitant en rivière. La notion de débit naturel a été largement discutée dans le cadre de la mise en place de la Directive cadre européenne sur l'eau. On peut retenir de ce rapport (EU, 2015) que le régime hydrologique d'une rivière est qualifié d'écologiquement bon si la quantité et la dynamique de ses écoulements reflètent les conditions d'écoulements sans perturbations anthropogéniques. Ici, on appellera débit naturel un débit de référence existant avant toute influence connue.

❖ Influences anthropiques considérées

La modification du débit d'un cours d'eau par l'activité humaine peut avoir plusieurs origines : changement de l'occupation du sol, modification de la géomorphologie du lit, prélèvements, rejets, transferts, ouvrages hydrauliques (seuils, barrage), déconnexion entre rivière et nappe, etc. Dans le cadre de ce travail de Master, par souci de simplification, nous nous limiterons aux influences locales, identifiables et quantifiables qui modifient les volumes des cours d'eau.

❖ Cadre d'application

Bien que certaines méthodes présentées ultérieurement permettent également de dénaturiser les débits, nous n'aborderons dans notre étude que le cas où l'on souhaite passer d'un débit influencé à un débit naturalisé. De plus, nous considérerons avoir toujours accès au débit influencé observé.

1.2. Classification des méthodes

Suite à nos recherches bibliographiques, nous constatons l'existence de nombreuses méthodes de naturalisation de nature mathématique. Cependant, elles ont le plus souvent été développées pour des applications à des cas particuliers. Leur niveau de complexité, ainsi que les outils et les données utilisées diffèrent donc selon les travaux. Nous avons cependant pu distinguer cinq grandes familles de méthodes, que nous avons regroupées en trois catégories.

1.2.1. Bilan sur ouvrage

La méthode des bilans sur ouvrage est une méthode de bilan en eau où l'on considère notre source d'influence comme un système ouvert. Un bilan hydrologique est alors effectué sur le système afin d'estimer la variation de volume induite par la source de l'influence. Il suffit ensuite, pour naturaliser le débit à l'aval, d'ajouter la variation de volume au débit influencé observé comme illustré sur la Figure 1.

Néanmoins, la propagation hydraulique du débit entre la sortie du système et la station A (Figure 1) peut avoir un impact sur le calcul du débit naturalisé. En effet, le $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ calculé à un instant t n'aura

pas un impact immédiat sur le débit de la station aval, mais aura un impact au temps $t + \Delta p$, où Δp correspond au temps de propagation. Selon la distance entre l'influence et la station, il sera donc conseillé d'utiliser un modèle de propagation qui aura en entrée $Q_{naturalisée}^{Sortie}$. Il faudra cependant veiller à prendre en compte les apports intermédiaires entre le système et la station, comme c'est le cas par exemple dans les travaux menés par Hydratec (2011) pour la naturalisation des débits de la Seine.

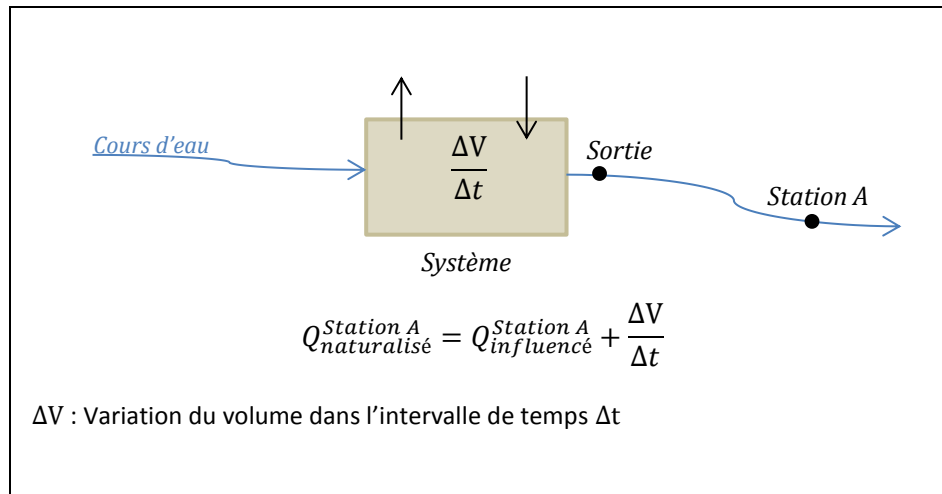


Figure 1 : Schéma de naturalisation par la méthode de bilan sur ouvrage.

Des travaux utilisant la méthode de bilan sur ouvrage sont présentés en Annexe 1. Il ressort que la complexité de cette méthode repose sur le fait qu'il est difficile d'avoir une bonne estimation de tous les termes du bilan hydrologique, ce qui introduit un facteur d'erreur dans les séries de débits naturalisés. Afin de minimiser les erreurs, une corrélation entre les débits naturalisés et les débits naturels de cours d'eau voisin peut être établie, comme c'est le cas dans les travaux de Wallace et al. (1988).

Au final bien qu'étant très simple d'utilisation, l'application de la méthode de bilan sur ouvrage peut être délicate sur des bassins fortement anthropisés, car elle nécessite d'avoir accès à la localisation et aux caractéristiques de chaque influence. De plus, le choix du pas de temps doit être adapté au comportement temporel de l'influence. Par exemple, dans le cas où l'influence à un comportement semestriel, le pas de temps de l'étude ne doit pas être supérieur à ce dernier.

1.2.2. Reconstitution et extension de série de débit naturel

Les modèles pluie-débit permettent la reconstitution et l'extension de séries de débits naturels. La reconstitution correspond à recréer dans le passé une série de données sans qu'il y ait nécessairement de données actuelles disponibles. L'extension de série correspond à étendre dans le passé une série de données déjà existante dans le temps. Ces deux méthodes nécessitent en entrée les données climatiques du bassin versant étudié. Des travaux utilisant ces méthodes sont listés en Annexe 2.

❖ Reconstitution de séries de débit naturel

La reconstitution de séries correspond au cas où nous ne disposons pas des débits naturels. Il convient alors de choisir un modèle qui prend en compte les influences anthropiques. Une fois les paramètres du modèle calés sur nos séries de débits observés, l'effet de nos influences sur le modèle est annulé, comme représenté sur la Figure 2, afin d'obtenir un débit naturel.

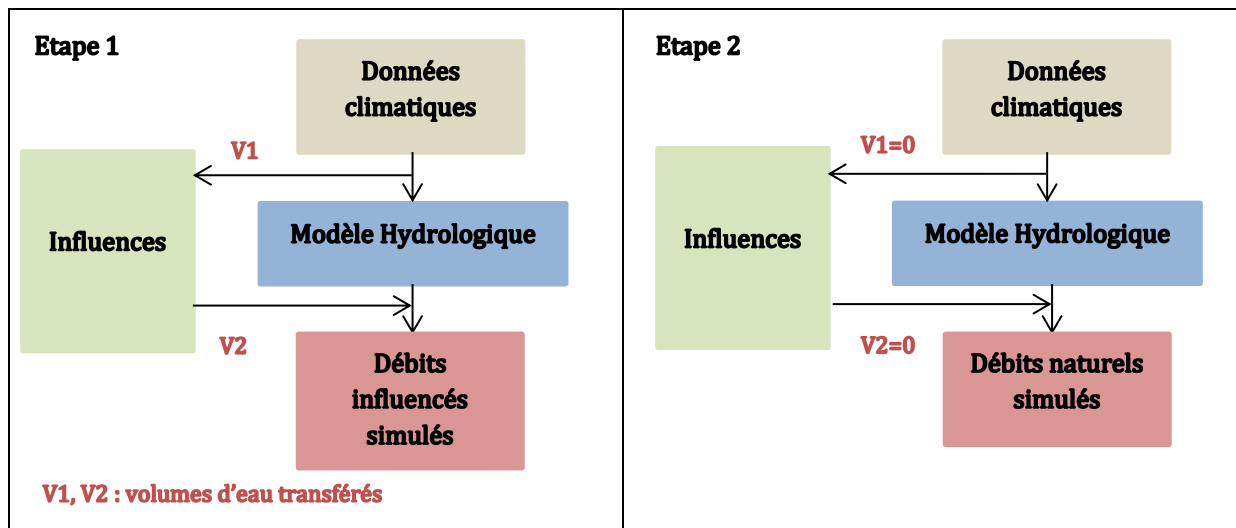


Figure 2 : Schéma simplifié d'un modèle hydrologique avec influence anthropique.

La qualité de la simulation dépend de plusieurs facteurs tels que la qualité des données en entrées, la capacité du modèle à représenter la dynamique du système modélisé ou encore l'estimation du jeu de paramètre du modèle.

❖ Extension de série de débit naturel

L'extension de série correspond au cas où nous disposons de séries de débits naturels passés, ainsi que des données climatiques couvrant l'ensemble de notre période d'étude. Le modèle est alors construit et calé en fonction de ces données de débits naturels antérieures. Un modèle hydrologique où n'apparaît aucun impact anthropogénique sera utilisé (Figure 3).

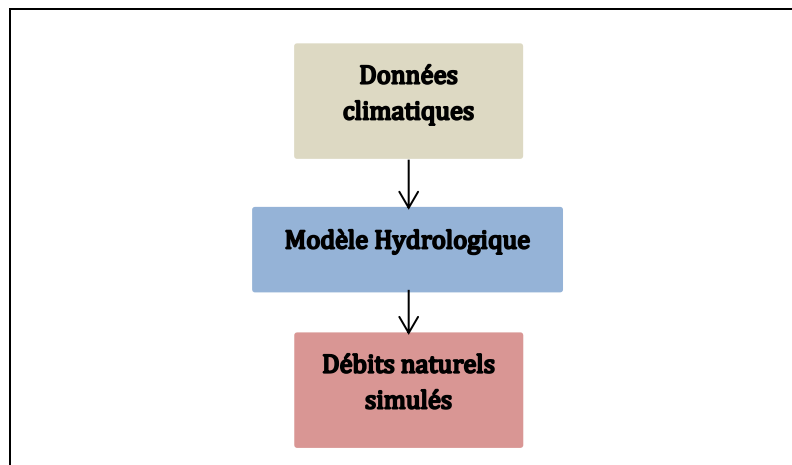


Figure 3 : Schéma simplifié d'un modèle hydrologique.

Faire tourner un modèle dans des conditions climatiques différentes des conditions de calage peut créer des incertitudes (Coron et al., 2012). La source de ces incertitudes peut être en partie expliquée par le fait que, dans les modèles, plusieurs paramètres physiques (sol, végétation, etc.) sont liés aux conditions climatiques. Le calage du modèle crée ainsi une interaction entre les paramètres et les caractéristiques climatique de la période du calage. Dans le cas d'études sur l'impact du changement climatique, il est donc difficile de savoir quelle est la part de changement due à ces incertitudes et quelle est la part du changement due à l'évolution du climat. De même, dans le cadre de nos travaux, l'étape d'estimation des paramètres du modèle apportera des incertitudes, dont il faudra tenir compte pour quantifier les incertitudes sur les estimations produites de débits naturalisés.

1.2.3. Méthodes par voisinages

Un certain nombre de méthodes exploitent la ressemblance entre bassins versants pour estimer des débits en des points des cours d'eau. Deux de ces méthodes sont présentées ici. La méthode des bassins appariés est bien adaptée pour estimer les débits d'un bassin où aurait eu lieu un changement à partir d'un bassin resté inchangé. Les méthodes de régionalisation, elles, ne sont pas directement faites pour les cas de changement, mais peuvent être utilisées pour cela. Dans le cadre de ce travail de Master, ces deux types de méthodes ne seront cependant pas appliqués, faute de temps suffisant.

❖ Bassins appariés

La méthode des bassins appariés est une méthode débit-débit. Elle repose sur le principe que nous pouvons simuler le débit à la sortie d'un bassin versant grâce aux débits d'un ou plusieurs bassins versants voisins au comportement similaire (Andréassian et al., 2012). En effet, des relations peuvent ainsi être établies entre les débits du bassin cible avant influences et les débits naturels d'un bassin versant voisin. En faisant l'hypothèse que cette relation est stationnaire, nous pouvons utiliser les débits des bassins versants non influencés pour estimer le débit naturel de notre bassin. Pour utiliser cette méthode il est donc indispensable d'avoir les débits naturels avant influence de notre bassin d'étude ainsi que les débits naturels des bassins versants voisins sur toute la période considérée.

Cette méthode ne fera pas l'objet d'application dans notre étude. Cependant, les travaux de Hernández-Henríquez et al. (2010) appliquent une variante de la méthode de Hirsch MOVE I (Hirsch, 1982) pour naturaliser les débits de La Grande Rivière au Canada grâce aux débits naturels de rivières adjacentes.

❖ Régionalisation

Les méthodes de régionalisation ont été développées pour estimer les débits en des points non jaugés des cours d'eau, à partir de la connaissance régionale des débits sur des cours d'eau voisins ou similaires (Oudin et al., 2008). Dans notre cas, nos bassins versants influencés cible sont jaugés, mais les débits naturels ne sont pas mesurables. En ce sens, on peut considérer les bassins naturels correspondants comme non jaugés et les méthodes de régionalisation semblent alors applicables. Dans notre contexte, la régionalisation désignera donc l'utilisation d'une information régionale basée sur des bassins versants jaugés naturels pour reconstituer les débits naturels d'un bassin versant cible influencé. Les méthodes de régionalisation peuvent être classées selon trois familles : les méthodes de régionalisation basées sur la régression, les méthodes basées sur la proximité spatiale et les méthodes basées sur les similarités physiques. Compte tenu des travaux d'évaluation déjà réalisés sur ces méthodes, on pourrait s'attendre à ce qu'elles donnent des résultats beaucoup plus incertains que les autres méthodes citées plus haut. Elles pourraient cependant se révéler utile dans le cas de données très limitées.

1.2.4. Synthèse

L'application de ces méthodes nécessitant des observations et paramètres différents, un tableau synthétisant ces critères est proposé ci-dessous. Il reste cependant assez général car le choix du modèle hydrologique utilisé ou encore l'amélioration de méthode ont des contraintes qui leur sont spécifiques.

Tableau 1 : Synthèse des conditions d'utilisation des différentes méthodes de naturalisations.

		Méthodes				
		Bilan sur ouvrage	Extension	Reconstitution	Bassins appariés	Régionalisation
Conditions	Données sur les influences (localisations, comportement temporelle)					
	Série de débits naturels observés avant influence					
	Série de débits influencés observés sur la période d'étude					
	Série de débits naturels observés de cours d'eau voisins avant influence					
	Série de débits naturels observés de cours d'eau voisins sur la période d'étude					
	Données climatiques avant influence					
	Données climatiques sur la période d'étude	*Si altération climatique locale				
	Données climatiques de cours d'eau voisins sur la période d'étude					

2.

Bassin versant de la Seine

2.1. Choix du bassin

Dans le cadre de ce travail, l'application des méthodes de naturalisation se fera sur le bassin versant de la Seine, en amont de Paris, qui englobe trois affluents principaux : la Marne, l'Aube et l'Yonne (Figure 4). Ce bassin a été choisi du fait de son important rôle socio-économique et de la qualité de la base de données disponible. Nous avons en effet accès à des séries de données sur plus d'un demi-siècle et connaissons les principales modifications anthropiques subies au cours du temps. De plus, le bassin de la Seine et les effets anthropiques sur ce dernier ont déjà fait l'objet de plusieurs travaux, comme par exemple Viennot et al. (2006) qui déterminent l'influence des prélèvements de la nappe phréatique sur le fonctionnement hydrodynamique de la Seine. Les travaux menés par Hydratec (2011) sur la naturalisation des débits du bassin amont de la Seine seront par ailleurs un élément majeur de notre étude.

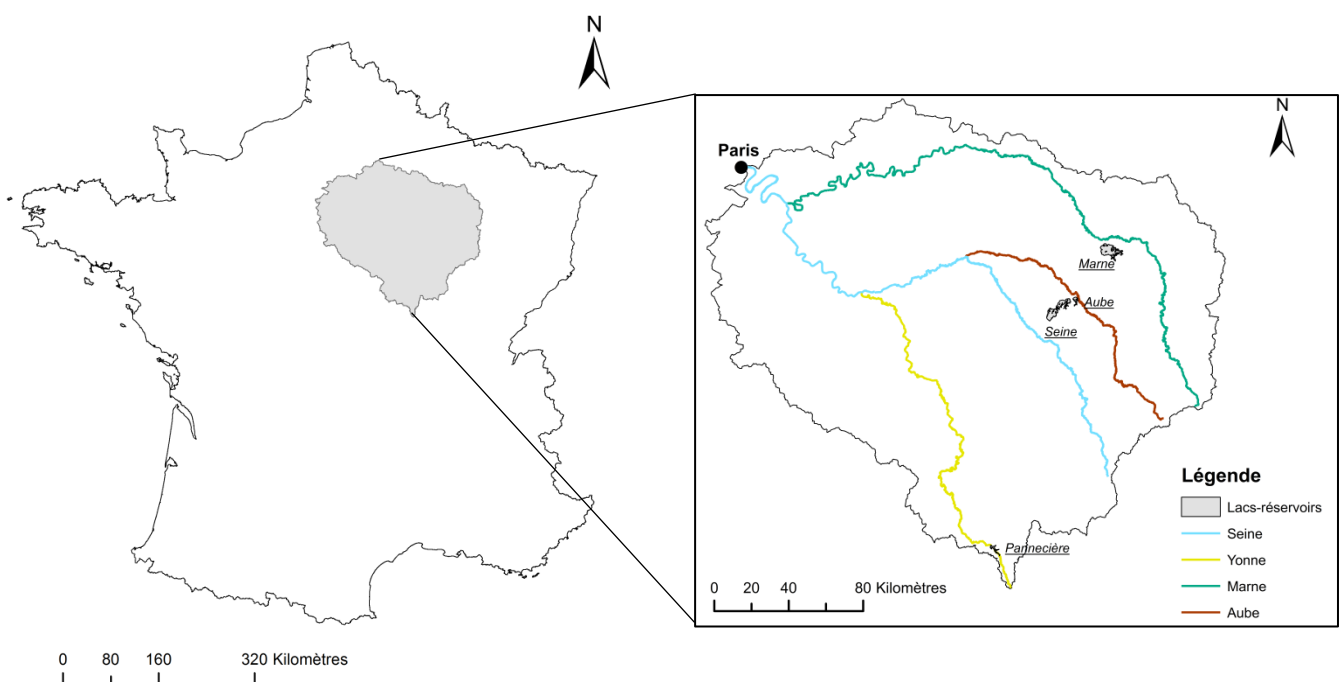


Figure 4 : Carte du bassin versant amont de la Seine et de ses principaux affluents.

2.2. Régime hydrologique

Le régime hydrologique de la Seine est de type pluvial océanique. Il se caractérise par de hauts débits et une faible évapotranspiration en hiver, et par de faibles débits accompagnés d'une forte évapotranspiration en été. L'influence de la neige sur ce type de régime hydrologique est globalement faible et ne fera donc pas l'objet d'un traitement particulier ici. L'Aube, la Marne et l'Yonne présentent des régimes hydrologiques très similaires à celui de la Seine du fait qu'ils partagent le même climat tempéré, la même absence de relief marqué et des caractéristiques géologiques comparables.

Durant ces derniers siècles, le régime hydrologique naturel de ces cours d'eau a été fortement altéré par les nombreuses activités anthropiques menées sur le bassin versant, notamment :

- les prélèvements dans les rivières,

- les prélèvements dans la nappe phréatique,
- la présence de lacs-réservoirs (barrages-réservoirs),
- les aménagements des voies navigables (écluses, etc.).

Se procurer les informations caractérisant toutes les influences demande une longue investigation et la prise de contact avec plusieurs agences et entreprises. L'ampleur de la tâche étant trop importante pour le cadre de ce travail de Master, seule l'influence des lacs-réservoirs sera prise en compte.

2.3. Les lacs-réservoirs

Quatre lacs-réservoirs, gérés par l'Établissement territorial public de bassin (EPTB) Seine Grands Lacs (<http://seinegrandslacs.fr/>), influencent les débits des principales rivières que sont la Marne, l'Aube, la Seine et l'Yonne. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 5, le lac-réservoir de l'Aube influence significativement le débit de la station d'Arcis-sur-Aube située à l'aval. Après sa mise en service en 1990, les débits maximaux semblent ne jamais excéder 3.6 mm/j et les débits minimaux de descendent jamais sous la valeur de 0.15 mm/j.

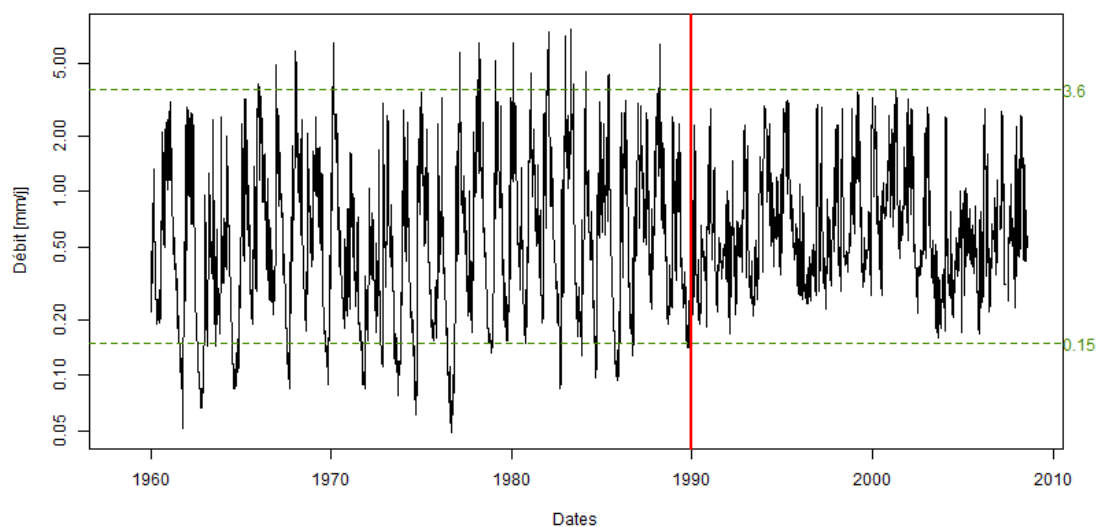


Figure 5 : Hydrogramme de l'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010) avant et après la mise en service du réservoir en 1990 (trait rouge).

2.3.1. Gestion des lacs-réservoirs

Le principal rôle des lacs-réservoirs est de soutenir le débit à l'aval pendant l'étiage ainsi que de diminuer le risque d'inondation. Ainsi, comme nous pouvons le voir sur la Figure 6 avec le réservoir de l'Aube, le remplissage du lac démarre en principe le 1^{er} novembre et s'achève fin juin. Puis une vidange du lac est effectuée de début juillet à fin octobre. Ces périodes, définies par arrêté inter-préfectoral, peuvent varier selon les aléas climatiques. Tous les barrages présentent ce même mode de gestion (Annexe 3).

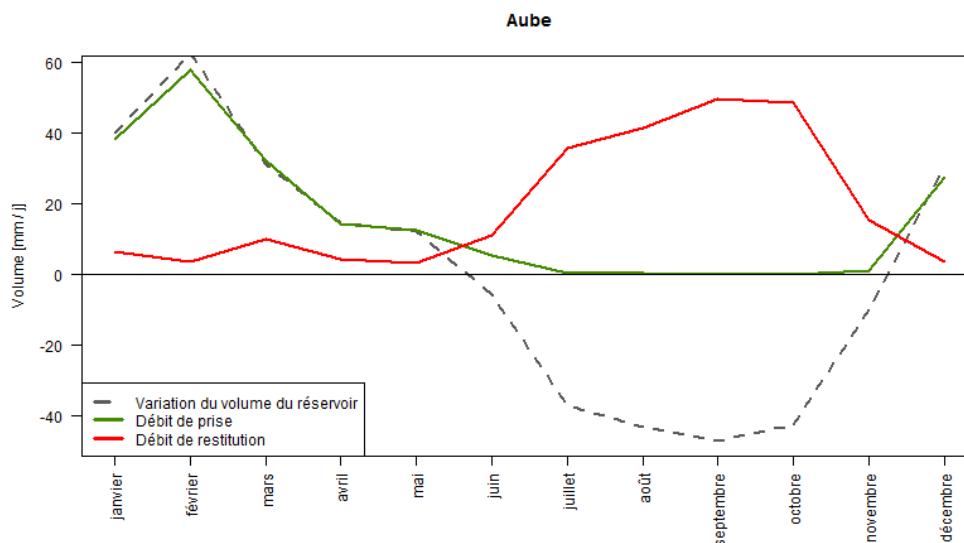


Figure 6 : Variation mensuelle du volume du réservoir de l'Aube, du débit de prise et de restitution (période considérée : 1995 - 2006) .

2.3.2. Présentation des lacs-réservoirs

Nous allons dans cette partie présenter chaque lac-réservoir. Des informations complémentaires sont disponibles en Annexe 3.

❖ Lac-réservoir de Pannecièrre

Le lac-réservoir de Pannecièrre, situé sur l'Yonne, est le seul construit au fil de l'eau (Figure 7). Il est alimenté par l'Yonne ainsi que par l'Oussière. De nombreux cours d'eau et ruisseaux pérennes alimentent également le lac-réservoir, cependant ils ne font l'objet d'aucun jaugeage. Un bassin de compensation d'une capacité de 370 000 m³, géré par EDF, se trouve à l'aval du lac-réservoir. Une partie de l'eau restituée sert à l'alimentation du canal du Nivernais. Ce dernier se divise en deux avec une branche s'écoulant jusqu'à la rivière Decize (Loire), et une branche parallèle à l'Yonne jusqu'à Auxerre. N'ayant des stations de jaugeage qu'à l'aval d'Auxerre et pas de données sur le débit servant à l'alimentation de la Decize, nous ne considérerons dans notre étude que le débit restitué dans l'Yonne additionné au débit d'alimentation du canal du Nivernais.

❖ Lac-réservoir de la Seine

Le lac-réservoir de la Seine, nommé lac d'Orient, présente la spécificité d'être construit en dérivation comme les lacs-réservoirs de l'Aube et de la Marne (Figure 8). Un canal d'aménée de 12.6 km alimente le lac. L'eau est ensuite restituée à la Seine via un canal de restitution de 24.6 km se divisant en deux branches. Le lac-réservoir de la Seine est géographiquement très proche du lac-réservoir de l'Aube, situé à moins de 200 mètres au nord-est. De ce fait, en plus d'avoir une superficie similaire (23 km²), ils partagent les mêmes conditions climatiques.

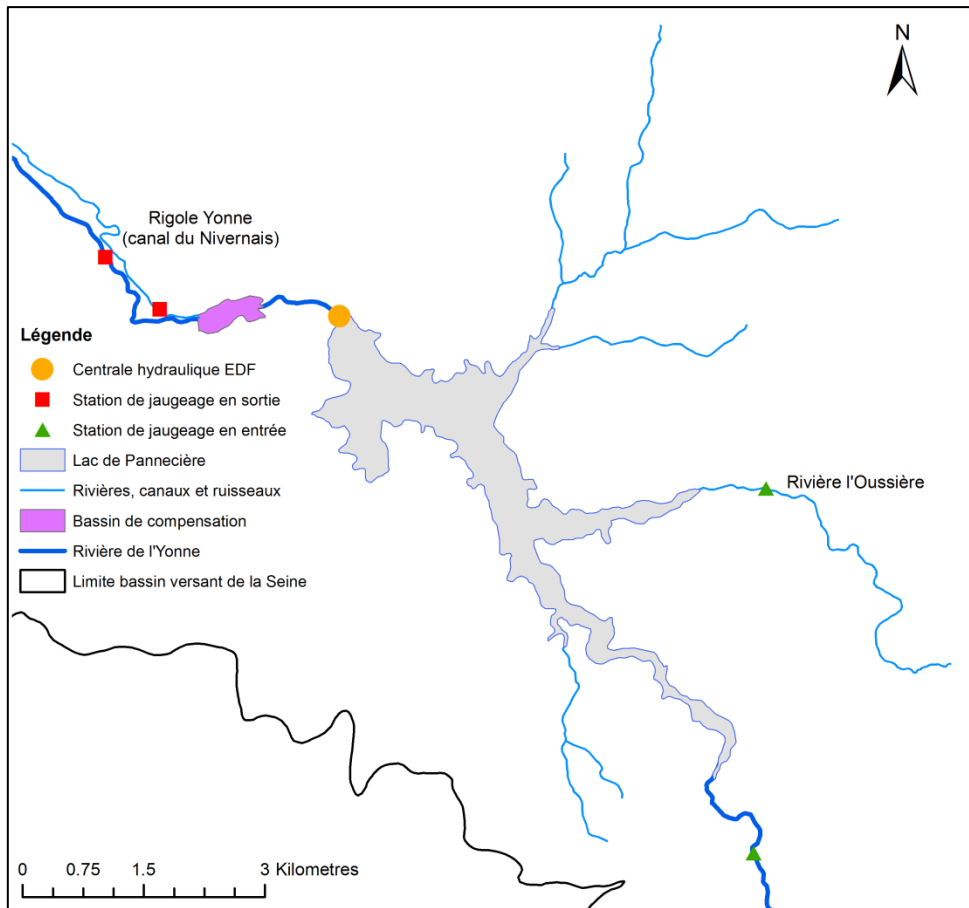


Figure 7 : Carte du lac-réservoir de Pannecière.

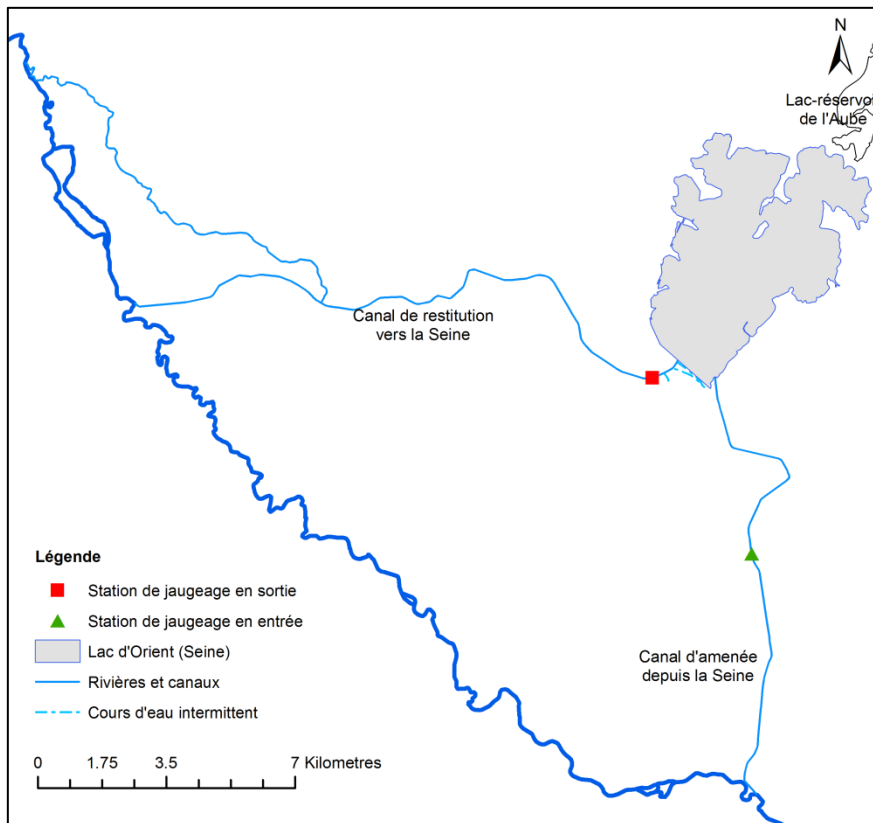


Figure 8 : Carte du lac-réservoir de la Seine.

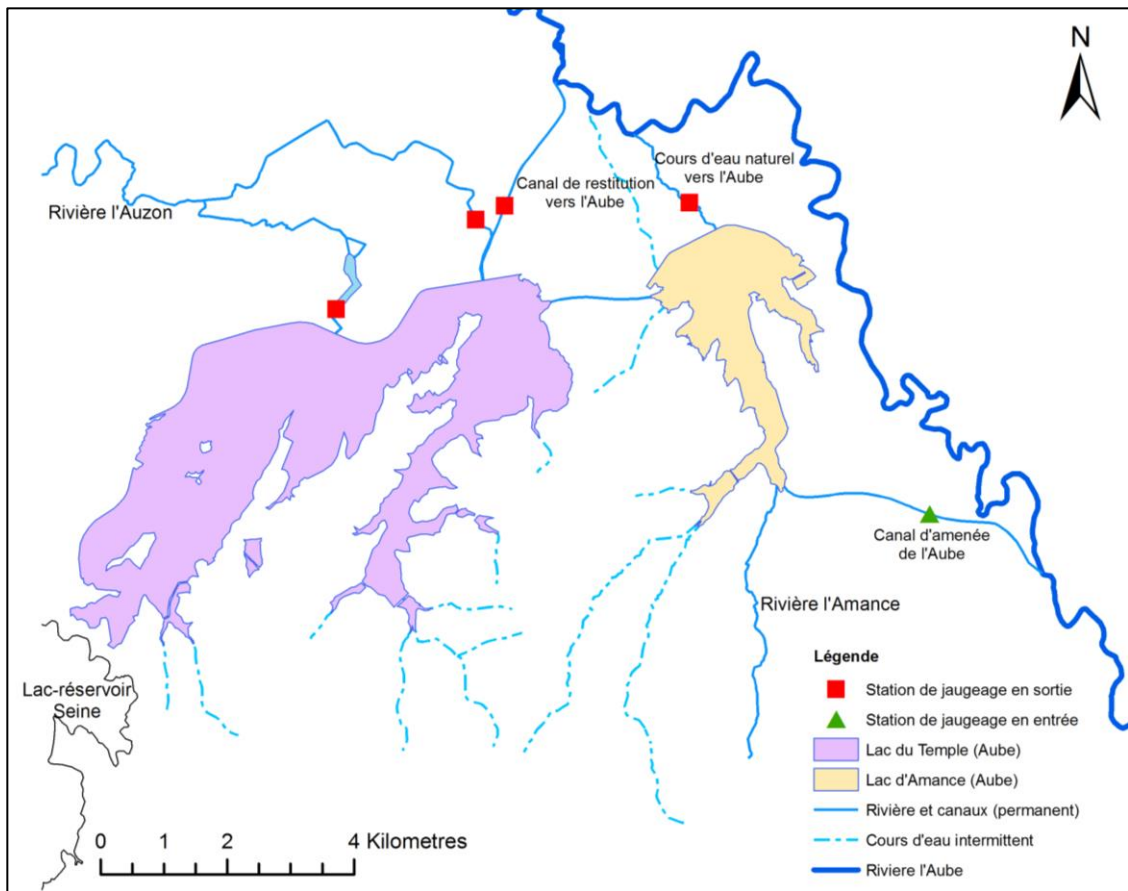


Figure 9 : Carte du lac-réservoir de l'Aube.

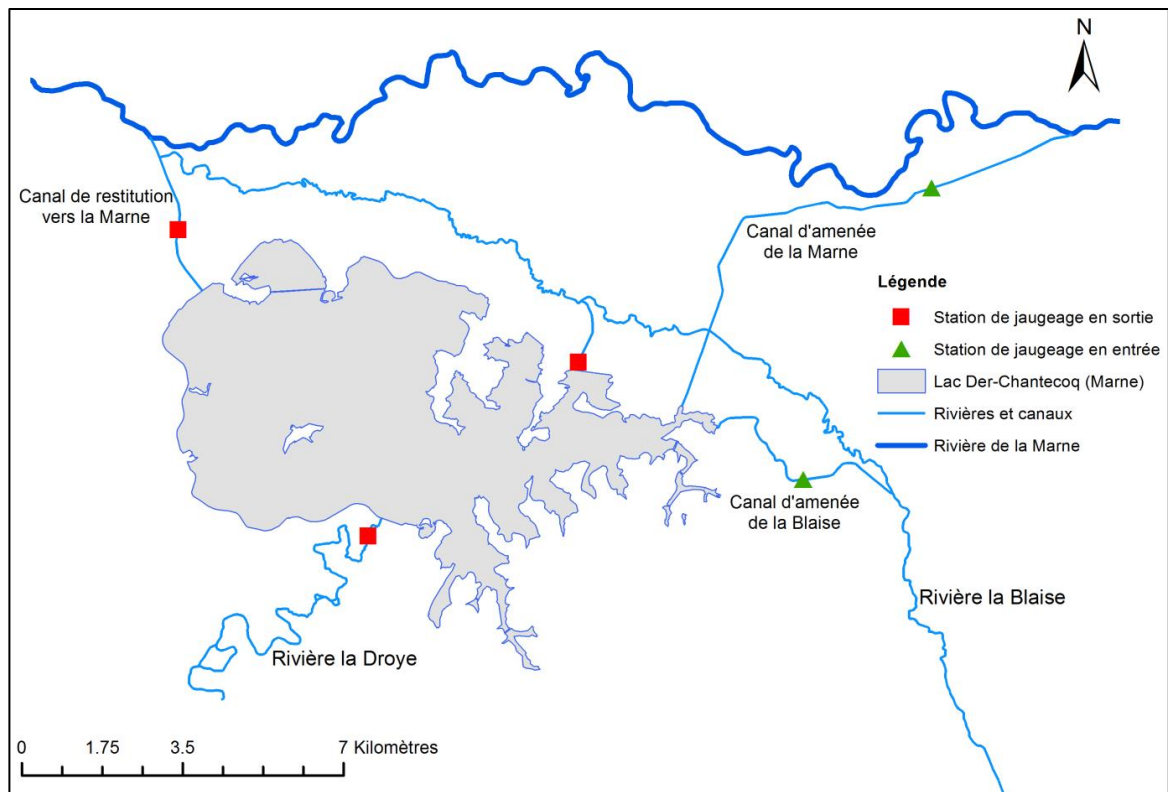


Figure 10 : Carte du lac-réservoir de la Marne.

❖ Lac-réservoir de l'Aube

Le lac-réservoir de l'Aube se divise en deux lacs : le lac du Temple et le lac d'Amance (Figure 9). Ceci permet, lors des vidanges décennales, d'avoir au moins un lac en service. Les lacs sont alimentés par l'Aube via un canal d'amenée. Cependant, nous constatons que beaucoup de cours d'eau intermittents s'écoulent également dans les deux bassins. Ils constituent les apports non contrôlés. Une partie de l'eau, de l'ordre de $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$, est restituée vers la rivière Auzon. Cette dernière rejoint l'Aube en amont d'Arcis-sur-Aube.

❖ Lac-réservoir de la Marne

Le lac-réservoir de la Marne, dit lac du Der-Chantecoq, est le deuxième plus grand lac artificiel de l'Union Européenne en termes de superficie. Il est alimenté par la Marne et la Blaise (Figure 10). La Blaise est enterrée à son croisement avec le canal d'amenée. L'eau est ensuite restituée vers la Marne, ainsi que vers la rivière Droye au sud du lac. Les restitutions à la Droye sont relativement faibles, de l'ordre de $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.4. Base de données

Du fait de la diversité des méthodes et des entrées nécessaires à leur utilisation, une importante base de données a été constituée dans cette étude.

2.4.1. Données hydrologiques

Les données de débits observés proviennent de la Banque HYDRO (www.hydro.eaufrance.fr). Nous avons également des données de débits naturalisés provenant de la base de données de Seine Grands Lacs allant de 1958 à 2006. Ces données, sur la période allant de 1994 à 2009, ont été produites par Hydratec (2011). Ces débits naturalisés ont été obtenus via la méthode de bilan sur ouvrage, avec couplage d'un modèle hydraulique et prise en compte des apports intermédiaires. De plus, afin de s'assurer de la cohérence des résultats, des courbes de double cumul ont été réalisées entre les débits naturalisés des stations et les débits naturels de stations en amont des barrages. Des corrections sur les débits naturalisés ont été effectuées selon les résultats de ces courbes.

2.4.2. Données climatiques

Les données climatiques utilisées sont issues de la réanalyse climatique SAFRAN (Vidal et al., 2010). Les données SAFRAN sont spatialisées sur une grille de $8 \times 8 \text{ km}$. Dans notre étude, nous utiliserons essentiellement les données de pluie issues de SAFRAN, ainsi que l'évapotranspiration potentielle obtenue avec la formule d'Oudin basée sur la température (Oudin et al., 2005). Nous disposons pour cette étude des données sur la période août 1958 – juillet 2014. Ces données comportent une incertitude due aux erreurs de mesures ou encore à l'interpolation spatiale effectuée dans la réanalyse, mais l'on considérera ici que ces données sont déjà de très bonne qualité pour les objectifs de l'étude. Notons cependant que le « panier » de stations utilisé dans la réanalyse varie au cours du temps, ce qui peut conduire à des estimations non stationnaires des variables climatiques produites, en particulier pour les bassins les plus petits. Nous négligerons cela ici.

Dans nos calculs, nous utiliserons l'évapotranspiration potentielle comme estimation de sorties par évaporation du lac, ce qui introduit une incertitude sur nos résultats. Pour avoir une meilleure estimation de l'évaporation au niveau des lacs-réservoirs considérés, nous avons également utilisé des données de température de l'eau, qui proviennent du rapport de Prats et al. (2015) sur l'optimisation du réseau national de suivi pérenne in situ de la température des plans d'eau.

2.4.3. Données d'exploitation des lacs-réservoirs

Des données d'exploitation, fournies par l'institution Seine Grands Lacs, sont produites quotidiennement pour chaque lac-réservoir. Des mesures manuelles sont effectuées chaque jour entre 7h30 et 8h30 en plus des données issues du réseau de mesures télétransmises. Les mesures utilisées dans nos travaux sont les débits de prises et de restitutions, ainsi que la variation de volume du réservoir. Dans un rapport sur le lac-réservoir de la Seine (BCEOM, 1999), plusieurs incertitudes ont été identifiées sur les mesures utilisées. Nous allons présenter les principales.

Les incertitudes de mesures et les moyens de conversion utilisés

Les débits aux stations de jaugeage sont estimés grâce à la mesure de la hauteur d'eau et à une courbe de tarage. On estime que ces débits comportent une incertitude de l'ordre de 5 à 10%.

De plus, en période d'étiage, les stations situées à quelques centaines de mètres de la sortie du réservoir sont soumises aux variations de débits générées par la manœuvre des ouvrages. Les mesures sont donc effectuées sur des stations plus à l'aval.

Estimation du débit de prise et de restitution

Le débit de prise et de restitution sont calculés grâce à des formules faisant intervenir l'ouverture des vannes ainsi que la différence de cotes amont et aval. Nous avons donc une incertitude liée à l'ouverture des vannes qui, dans le cas de la Seine, est de l'ordre de $0.73 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le débit restitué. Nous avons également une incertitude liée à l'estimation de la différence altimétrique, de l'ordre de $2.53 \text{ m}^3/\text{s}/\text{cm}$ pour les débits de prise de la Seine.

Bien que nous ayons une estimation du débit de prise et de restitution ainsi que des données climatiques sur les lacs, nous n'avons pas toutes les mesures des apports extérieurs. Ainsi certains ruisseaux ou canaux d'amenée ne sont pas compris dans les débits de prise estimés.

Estimation du volume dans le lac-réservoir

On considère que le vent n'a pas d'incidence importante sur les mesures de volumes des réservoirs. En effet, les mesures étant effectuées à 8h, et les vents étant plus faibles en matinée, les vagues générées ont une amplitude très faible.

Une des principales sources d'incertitudes est la non-horizontalité du plan d'eau. En effet, lorsqu'il y a de forts débits de prise ou de restitution, il se peut que la surface du lac-réservoir ne soit pas absolument horizontale. Le volume estimé, issue d'une relation hauteur-volume, ne correspondra donc pas au volume réel.

On suppose de plus que la mesure de la hauteur d'eau a une précision de l'ordre du centimètre. Une erreur de 1 cm sur l'estimation de la hauteur d'eau peut donc avoir un impact important sur le calcul du volume équivalent. Par exemple dans le cas de la Seine, 1 cm de hauteur peut correspondre à un volume de l'ordre de $237\,000 \text{ m}^3$. En plus de cette incertitude liée à la lecture, les données de volume fournies sont en millions de m^3 avec une précision de deux décimales. Nous avons donc une précision sur nos données de $5\,000 \text{ m}^3$ soit $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.4.4. Choix des stations hydrométriques

Nos travaux s'appuyant sur ceux d'Hydratec, nous avons choisis de considérer dans notre étude les huit mêmes stations influencées, à l'exception des stations de Montereau, Nogent-sur-Seine, Chaumard et Noisiel qui n'avaient pas ou peu de débits observés sur nos périodes considérées. De plus, la station de Blaincourt étant une des rares à posséder des données de débits naturel observés, nous avons choisi de l'inclure dans notre base de données. L'emplacement des stations et leur bassin versant associé sont présentés sur la Figure 11.

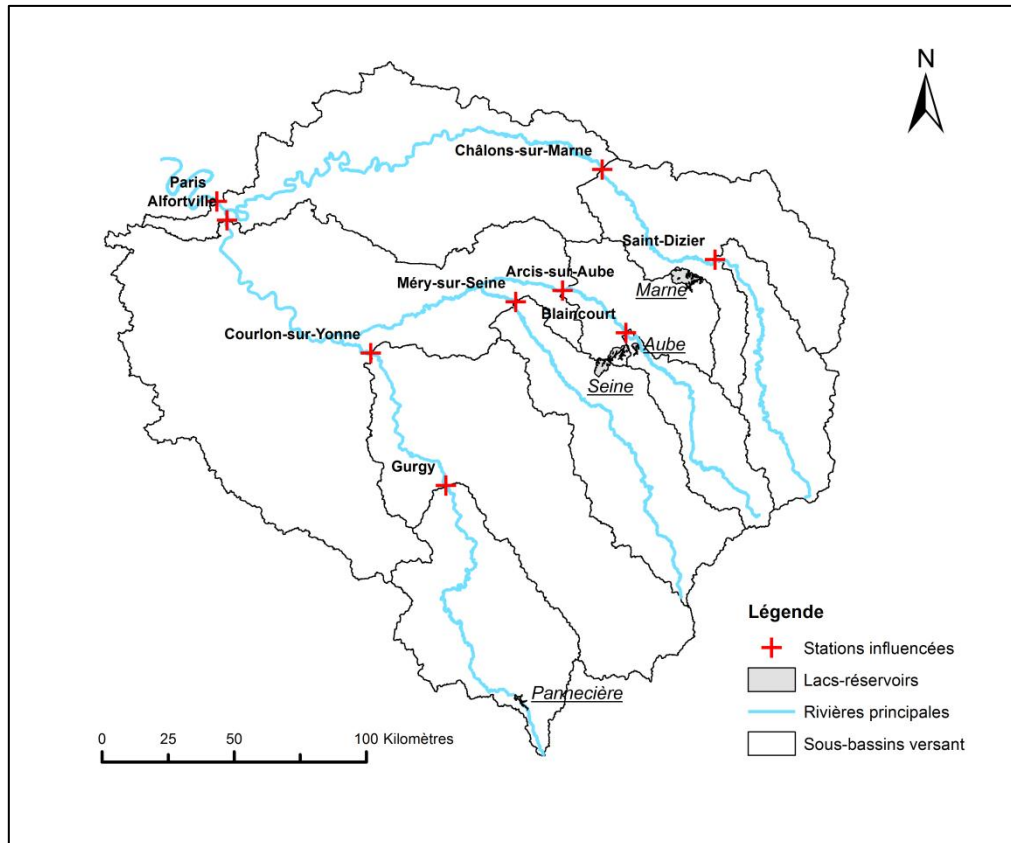


Figure 11 : Carte des stations hydrométriques, sur le bassin amont de la Seine, influencées par les lacs-réservoirs.

Certaines stations étant influencées par plusieurs lacs-réservoirs, nous avons décidé de leur attribuer un indice caractérisant la distance station-influence pour une meilleure interprétation des résultats. Cet indice, proposé par Payan (2007), est obtenu selon la formule suivante :

$$i_1 = 1 - \frac{\sum_j dh_j \cdot Vol_j}{L \cdot \sum_j Vol_j} \quad \text{Équation 1}$$

où j correspond aux nombres de barrages présents sur le bassin versant, dh_j correspond à la distance hydraulique entre la station et le barrage j , Vol_j correspond au volume maximal du barrage j , et L correspond au plus long parcours hydraulique du bassin.

i_1 prend des valeurs dans l'intervalle [0,1]. Plus l'indice est proche de 1, plus la station est proche des barrages. Nous classerons ainsi les stations prises en compte dans notre étude selon leur proximité par rapport aux barrages (Tableau 2).

Tableau 2 : Classement des stations hydrométriques selon l'indice distance-influence.

Station	Indice i_1	Rang
Blaincourt	0.972	1
Saint-Dizier	0.950	2
Arcis-sur-Aube	0.837	3
Châlons-sur-Marne	0.797	4
Méry-sur-Seine	0.783	5
Gurgy	0.543	6
Courlon-sur-Yonne	0.306	7
Alfortville	0.138	8
Paris	0.064	9

3.

Modèles et méthodologie

Dans cette partie, nous allons présenter les modèles et la démarche de test et d'évaluation des méthodes, qui ont été adoptés dans nos travaux.

3.1. Modèles utilisés

Du fait de la diversité des modèles hydrologiques utilisés dans les études de naturalisation, il a été choisi dans notre cas d'étude d'utiliser les modèles hydrologiques disponibles dans le package airGR développé par l'unité HBAN d'Irstea à Antony (<http://webgr.irstea.fr/>). Il s'agit des modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Le modèle Journalier à 4 paramètres GR4J, ainsi que les modèles à 5 et 6 paramètres (respectivement GR5J et GR6J) seront utilisés. Il est à noter que le modèle GR6J est a priori plus performant sur les faibles débits (Pushpalatha et al., 2011).

3.1.1. Modèle de bassin naturel : méthode d'extension de séries de débits naturels

Les modèles GR sont des modèles hydrologiques simples capables de simuler des débits naturels. Ils sont donc utilisables pour l'application de la méthode d'extension de séries de débits naturels. Ce sont des modèles apparentés aux modèles conceptuels. Leurs paramètres ne correspondent donc pas à des grandeurs physiques directement mesurables. Ils gèrent le comportement des réservoirs du modèle et leurs connexions. Le schéma du modèle GR4J et la signification des paramètres sont donnés à la Figure 12.

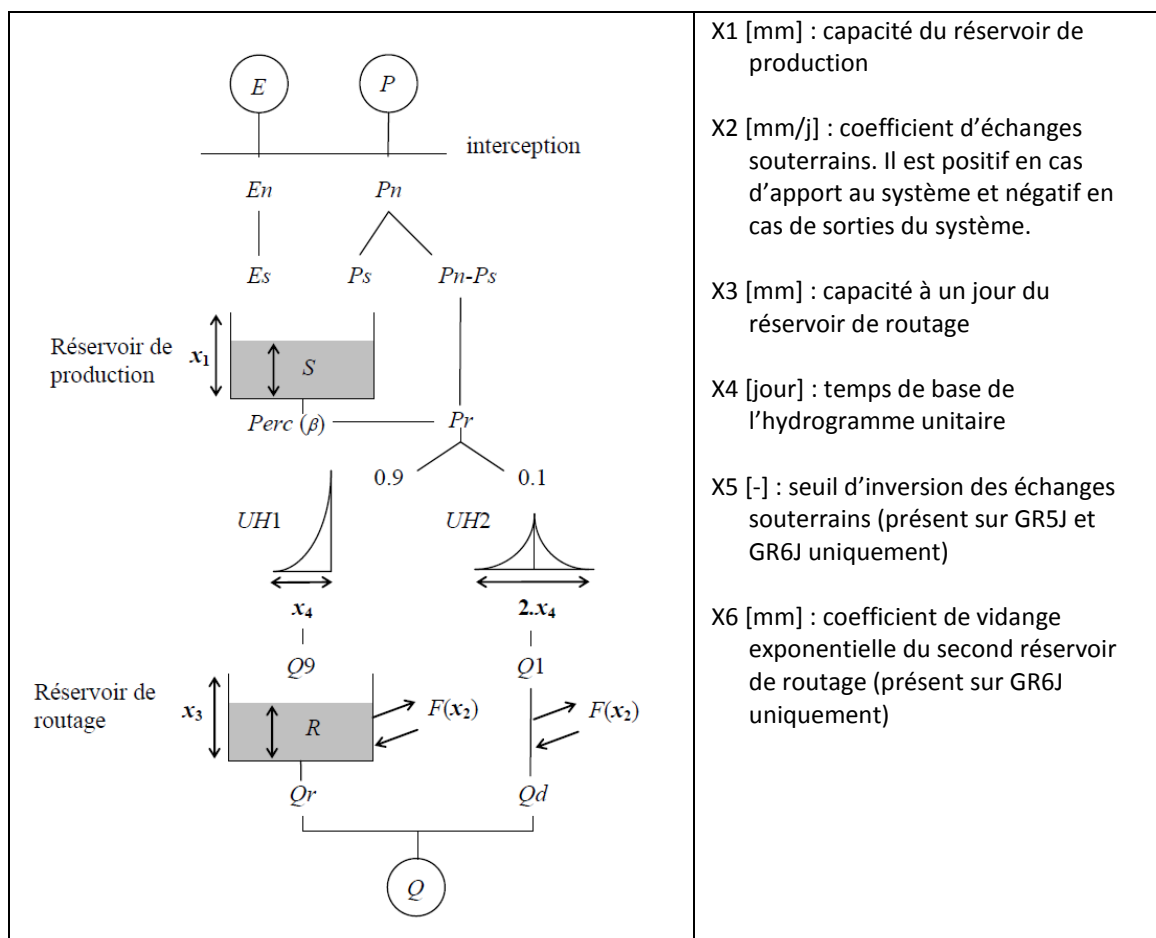


Figure 12 : Schéma du fonctionnement du modèle journalier GR4J.

3.1.2. Modèle de bassin influencé : méthode de reconstitution de séries de débits naturels

La méthode de reconstitution de séries de débits naturels nécessite l'utilisation d'un modèle hydrologique capable de simuler des débits influencés et dont les paramètres correspondent explicitement à l'influence (ici les lacs-réservoirs). Nous allons dans notre étude nous baser sur les travaux de Payan (2007) qui a inséré des lacs-réservoirs dans le modèle GR4J.

Les modèles GR étant des modèles hydrologiques conceptuels globaux, le bassin est considéré comme une entité indifférenciée et les différents paramètres ne correspondent pas à une réalité physique, ce qui rend complexe l'introduction de lacs-réservoirs dans le modèle. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 13, Payan a introduit dans GR4J un réservoir image qui correspond au lac-réservoir. La variable caractérisant ce réservoir image correspond à la variation de volume stocké dans le réservoir. Dans notre étude, ces valeurs sont calculées quotidiennement grâce aux hauteurs d'eaux mesurées sur le site et à une courbe de correspondance hauteur-volume. Dans le cas de stations influencées par plusieurs réservoirs, la variation du réservoir image correspondra à la somme des variations des différents réservoirs.

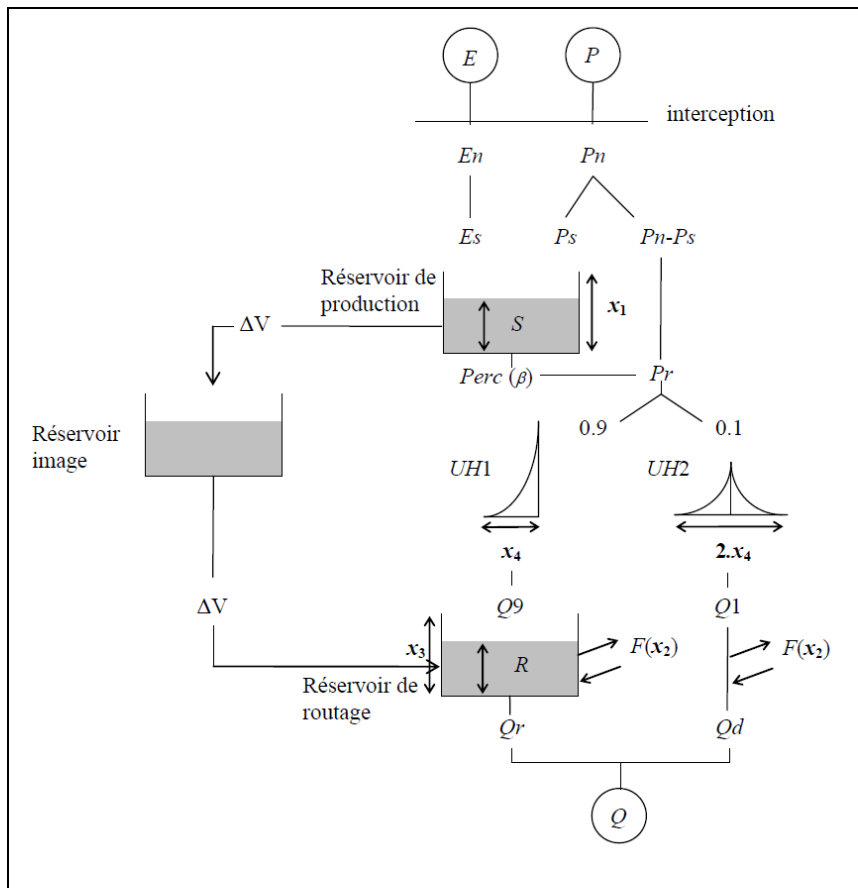


Figure 13 : Schéma du fonctionnement du modèle journalier GR4J avec inclusion des lacs-réservoirs.

La structure de GR5J étant similaire à GR4J, nous incluons le réservoir image de la même manière. Dans le cas de GR6J, le point de rejet se situera au niveau de Q9, sortie de l'hydrogramme unitaire UH1.

3.2. Formulation du bilan sur ouvrage

A l'échelle des ouvrages, le bilan en eau à un moment t est calculé selon la formule suivante (Payan, 2007):

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_e + P_{ret} - Q_s - p - E_{ret} - I_{ret} \quad \text{Équation 2}$$

avec $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ la variation du volume d'eau stocké pendant Δt , Q_e et Q_s les débits en entrée et sortie des ouvrages, P_{ret} la pluie tombant sur la retenue, E_{ret} l'évaporation de la retenue, p les prélèvements et I_{ret} l'infiltration au niveau de la retenue.

Ne disposant pas des données sur l'infiltration, et n'ayant pas d'information sur des prélèvements au niveau des lacs, nous simplifierons la formule comme suit:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_e + P_{ret} - Q_s - E_{ret} \quad \text{Équation 3}$$

Avec $\frac{\Delta V}{\Delta t} = V_t - V_{t-\Delta t}$, où V_t est le volume à l'instant t .

L'erreur du bilan hydrologique correspondra par la suite à la formule suivante :

$$Err = Q_e + P_{ret} - Q_s - E_{ret} - \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \text{Équation 4}$$

3.3. Choix des périodes d'analyse

Comme nous avons pu le voir dans la partie précédente, nous avons plusieurs sources de données avec des périodes différentes. Nous avons choisi de subdiviser notre étude en quatre périodes (Figure 14) :

- L'Aube ayant été mis en service en 1990, nous disposons de débits naturels observés sur les stations aval de Blaincourt, d'Arcis-sur-Aube et de Paris de 1974 à 1989. Cette période, correspondant à [P1+P2], a été subdivisée en deux sous-périodes afin de disposer de périodes de calage différentes pour nos modèles hydrologiques.
- [P3+P4] correspond à la période après mise en service des lacs-réservoirs où nous disposons des séries de débits influencés observés ainsi que des débits naturalisés d'Hydratec utilisés dans notre étude. Elle a été subdivisée en deux sous-périodes pour les mêmes raisons que précédemment.

Utilisant des modèles hydrologiques pour l'application de nos méthodes, l'année précédant ces périodes est utilisée pour leur préchauffage.

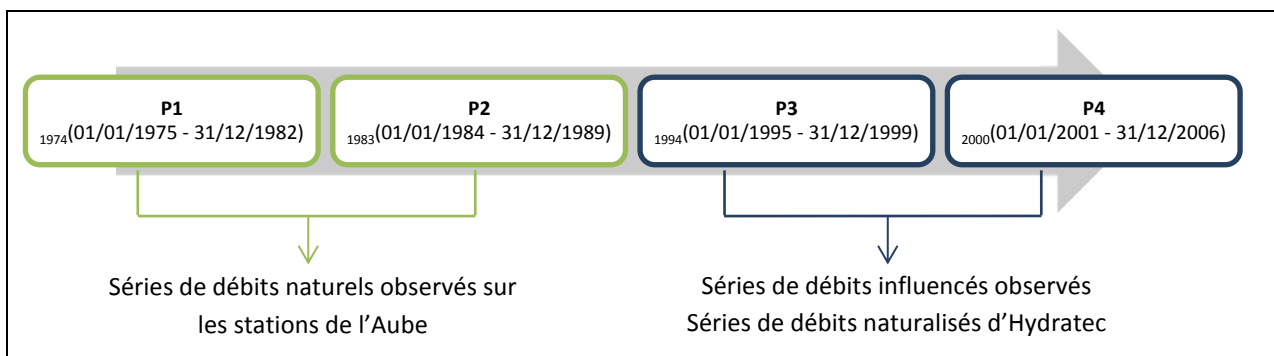


Figure 14 : Subdivision de la période d'étude.

3.4. Critères de calage et d'évaluation

L'évaluation de la qualité des simulations produites par les modèles hydrologiques se fait par comparaison de la série de débit produite et d'une référence (typiquement la série des débits observés). De nombreux critères numériques existent pour quantifier la distance entre les deux séries. Ces critères peuvent être utilisés soit pour le calage des paramètres des modèles (procédures automatiques), soit pour l'évaluation en phase de simulation/validation (voir par ex. Klemes, 1986, pour une procédure classique de test des modèles hydrologiques). Nous présentons dans la suite les critères retenus dans notre travail.

❖ Critère KGE

Afin de minimiser l'erreur des modèles, un calage des paramètres est effectué selon une fonction objectif définie. Dans notre cas, nous utiliserons le critère de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009) qui se présente sous la forme :

$$KGE(Q) = 1 - \sqrt{(\rho - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{Équation 5}$$

$$\text{où } \alpha = \frac{\sqrt{\sum_i (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}})^2}}{\sqrt{\sum_i (Q_{réf}(i) - \overline{Q_{réf}})^2}}, \quad \beta = \frac{\sum_i Q_{sim}(i)}{\sum_i Q_{réf}(i)}, \quad \rho = \frac{\sum_i (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}}) \cdot (Q_{réf}(i) - \overline{Q_{réf}})}{\sqrt{\sum_i (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}})^2 \sum_i (Q_{réf}(i) - \overline{Q_{réf}})^2}}$$

$Q_{sim}(i)$ et $Q_{réf}(i)$ sont respectivement le débit simulé et le débit de référence au jour i . $\overline{Q_{sim}}$ et $\overline{Q_{réf}}$ correspondent à leur moyenne sur l'ensemble de la période de calage. α , β et ρ sont respectivement la variance des écarts-types, le rapport de volume et la corrélation.

Le KGE varie entre $-\infty$ et 1. Plus il est proche de 1, plus les débits simulés sont proches des débits de référence. Dans notre cas, nous calerons le critère de Kling-Gupta sur la racine carrée des débits afin de ne pas donner de poids trop important aux plus forts débits (voir par ex. Oudin et al., 2006 ; Pushpalatha et al., 2012).

Cependant, le KGE ne donne qu'une indication sur les performances globales du modèle à produire des débits proches de ceux de références. C'est pourquoi nous allons nous intéresser à d'autres critères d'évaluation :

❖ Biais

Le biais du modèle, ou erreur de bilan, nous indique sur une période s'il y a surestimation ou sous-estimation du débit moyen par le modèle.

$$Biais = \frac{\sum_i Q_{sim}(i)}{\sum_i Q_{réf}(i)} \quad \text{Équation 6}$$

avec $Biais > 1$ si surestimation, $Biais < 1$ si sous-estimation et $Biais = 1$ pour un bilan parfait.

❖ Rapport des Q10 :

$$R_{10} = \frac{Q_{10sim}}{Q_{10réf}} \quad \text{Équation 7}$$

Le dixième percentile du débit, Q_{10} , correspond à une valeur de débit qui n'est pas dépassée par 10% de nos débits. Q_{10} est donc un indicateur sur les bas débits. En calculant le rapport des Q_{10} simulé et de référence, nous avons R_{10} inférieur à 1 si les bas débits simulés sont inférieurs aux débits références et R_{10} supérieur à 1 dans le cas contraire. Un rapport égal à 1 correspond au cas parfait où les deux percentiles sont égaux.

❖ Rapport des Q90 :

$$R_{90} = \frac{Q_{90sim}}{Q_{90ref}}$$

Équation 8

Le quatre-vingt dixième percentile, Q_{90} , correspond à une valeur de débit qui n'est pas dépassée 90% du temps et donne donc une indication sur les hauts débits. L'interprétation du critère est la même que pour le Q_{10} .

3.5. Estimation d'un intervalle de confiance par la méthode QUOIQUE

La méthode QUOIQUE (Quantification Opérationnelle de l'Incertitude prédictive par Quantiles de dEbits), développée par Bourgin (2014), permet de quantifier l'incertitude prédictive des modèles. Elle sera donc utilisée dans notre cas pour construire un intervalle de confiance sur nos débits naturels simulés par la méthode d'extension de série de débits.

L'application de cette méthode nécessite d'avoir des débits naturels observés avant influence et un modèle de bassin capable de simuler des débits naturels. La méthode QUOIQUE permet d'associer à chaque valeur de débit simulé les quantiles de l'erreur relative :

$$Err_{rel} = \frac{Q_{obs}}{Q_{sim}}$$

Équation 9

Dans notre étude, la borne inférieure de notre intervalle de confiance correspondra au 10^{ème} quantile de l'erreur relative, et la borne supérieure correspondra au 90^{ème} quantile de l'erreur relative, pour fournir donc des intervalles de confiance à 80%.

3.6. Démarche d'évaluation

3.6.1. Prérequis

Les résultats des questions suivantes sont primordiaux pour l'application de certaines méthodes de naturalisation de séries de débits. Bien que le contexte ne permette pas toujours d'y répondre (absence de séries de données, etc.), il est conseillé de valider ces questions avant l'application de ces méthodes.

QA1. Les modèles hydrologiques reproduisent-ils bien l'hydrologie naturelle du bassin versant ?

Les modèles hydrologiques utilisés doivent être capables de simuler des séries de débits naturels pour être utilisés comme outil dans la méthode d'extension de séries de débits. En effet, s'ils montrent un niveau d'erreur trop élevé, cela limitera la confiance que l'on peut avoir en leur capacité à générer des débits naturalisés fiables. Pour cela, nous allons caler et valider nos modèles sur les débits naturels observés des périodes P1 et P2.

QA2. Les modèles hydrologiques prenant en compte les lacs réservoirs reproduisent-ils bien l'hydrologie influencée du bassin versant ?

De même, pour être utilisés dans la méthode de reconstitution de débits naturels, les modèles hydrologiques utilisés doivent être capables de simuler des débits influencés proches des débits influencés observés. Afin de répondre à cette question, nous allons caler et valider nos modèles sur les débits influencés observés des sous-périodes P3 et P4.

3.6.2. Forces et faiblesses des méthodes utilisées

Pouvoir identifier les forces et faiblesse de nos méthodes de naturalisation permettra d'une part d'avoir un regard plus critique sur les débits naturalisés obtenus, et d'autre part d'orienter

l'utilisation de certaines méthodes selon les besoins émis. Les méthodes présentées étant de nature différentes, nous allons dans cette partie les évaluer individuellement.

- Bilan sur ouvrage

QB11. Quelle erreur comporte le bilan sur ouvrage ?

La variation du volume de nos réservoirs étant utilisée pour calculer le débit naturalisé, il convient de quantifier l'erreur que celle-ci comporte. Nous chercherons dans cette perspective à minimiser l'erreur et à évaluer quels sont les différents paramètres l'influençant.

QB12. L'obtention de débits négatifs est-elle significative ?

Nous savons que les équations gérant nos modèles hydrologiques sont bornées de façon à ce que l'obtention de débits négatifs à la sortie soit impossible. Cependant, l'application de la méthode de bilan sur ouvrage consistant à simplement soustraire l'influence de nos barrages sur les stations, il est fort probable que nous obtenions des débits négatifs. Nous allons donc nous pencher sur l'apparition de ces débits négatifs.

QB13. L'utilisation d'une méthode plus sophistiquée donne-t-elle des résultats proches de ceux obtenus ?

La méthode de bilan sur ouvrage appliquée par Hydratec présente un degré de sophistication bien plus élevé avec l'utilisation d'un modèle de propagation et différentes corrections apportées (cf. partie 2.4.1). En comparant nos résultats à ceux d'Hydratec, nous verrons si nos résultats restent comparables.

- Extension de séries de débit

QB21. Quelle est l'influence de la période de calage sur mon modèle ?

Comme évoqué précédemment (1.2.2), les débits naturalisés simulés sont influencés par les conditions de calage. Après calage sur P1, P2 et [P1P2], nous obtenons trois séries de débits naturalisés grâce à la méthode d'extension de séries de débits sur les stations de l'Aube sur la période [P3+P4]. Nous allons étudier les différences qu'il existe entre ces trois séries afin d'apprécier l'impact du choix de la période de calage sur notre méthode de naturalisation.

QB22. Quels intervalles de confiance sont associés aux résultats ?

Nous allons estimer l'erreur prédictive que comporte nos débits naturalisés grâce à la méthode QUOIQUE qui permet de quantifier l'incertitude prédictive des modèles. L'obtention d'un intervalle de confiance sur nos résultats nous permettra d'évaluer la justesse de la méthode pour chaque rang de débits. Les débits naturalisés évalués sont ceux obtenus après calage sur la période [P1P2].

3.6.3. Comparaison

La comparaison des différentes méthodes est rendue délicate par le fait qu'elles sont applicables sur des stations et des périodes différentes. Nous allons dans cette partie essayer de répondre aux questions suivantes :

QC1. Les méthodes de naturalisations sont-elles comparables ?

La comparaison des méthodes est délicate du fait que nous n'avons accès qu'aux débits influencés et non aux débits naturels de la période [P3P4]. De plus, nous ne pouvons pas estimer à l'heure actuelle quelle méthode donne les résultats les plus justes. Nous allons donc dans un premier temps

comparer les séries par paire afin de mieux apprécier leurs similitudes et différences. Puis dans un deuxième temps, nous verrons si les débits naturalisés obtenus avec les autres méthodes sont compris dans les intervalles de confiances obtenus avec la méthode QUOIQUE.

La comparaison se fera sur les débits naturalisés des stations d’Arcis-sur-Aube, Blaincourt et Paris sur la période [P3P4].

QC2. Concernant l’impact des lacs-réservoirs sur le régime hydrologique du bassin versant de la Seine, les méthodes de naturalisation arrivent-elles à des conclusions similaires ?

Les méthodes de naturalisation servant à identifier clairement l’impact anthropique, nous allons voir si les méthodes sélectionnées arrivent à des conclusions similaires.

QC3. Le couplage de différentes méthodes de naturalisation est-il possible ?

Comme nous l’avons vu dans le Tableau 1, l’application des différentes méthodes de naturalisation dépend avant tout de la disponibilité des données. Or dans le cas où ces données ne sont pas disponibles ou exploitables que sur l’ensemble de la période d’étude, le couplage de différentes méthodes de naturalisation peut être envisagé comme une solution.

Dans notre cas, nous appliquerons la méthode d’extension de séries de débits aux débits naturalisés, obtenus via la méthode de bilan sur ouvrage et de reconstitution de séries de débits, sur les périodes P3 et P4 à l’ensemble des stations du bassin versant de la Seine.

4.

Résultats

4.1. Prérequis

4.1.1. Performances des modèles GR simples

Afin d'évaluer la capacité de nos modèles à simuler des débits naturels sur le bassin versant amont de la Seine, nous avons effectué la procédure du *split sample test* (Klemes, 1986). Le calage du modèle est réalisé sur la première période, P1, et la validation sur la deuxième période, P2, puis le rôle des deux sous-périodes est inversé. L'étude se fait sur les stations aval de l'Aube, les seules ayant des données de débits naturels observés.

En Annexe 4 sont fournis les graphiques détaillés de performances pour le KGE, le biais, Q10 et Q90. Avec des KGE supérieurs à 0.85 et un écart très faible entre la période de calage et de validation, nos trois modèles sont aptes à simuler le régime hydrologique naturel de nos stations. Le biais reste relativement faible (moins de 5%) et les hauts débits simulés sont assez proches des hauts débits observés. Pour les bas débits, l'écart est plus important cependant et GR5J et GR6J se démarquent par leurs performances.

Nous pouvons conclure que les modèles GR, étant capables de reproduire les régimes naturels à nos stations d'études, sont utilisables pour appliquer la méthode d'extensions de séries de débits naturels sur le bassin amont de la Seine.

4.1.2. Performances des modèles GR incluant les lacs-réservoirs

Nous allons évaluer si nos modèles, incluant des lacs-réservoirs, sont aptes à simuler des débits influencés proches de ceux observés. Comme précédemment, un *split sample test* sera effectué sur les débits influencés observés des périodes P3 et P4.

Les résultats (détaillés en Annexe 5) montrent qu'avec un KGE supérieur à 0.85 et une faible différence entre les périodes de calage et de validation, nos modèles sont robustes et capables de reproduire les régimes influencés de nos stations. Nous constatons que les stations les plus à l'aval ont un biais plus important. Cependant, celui-ci reste inférieur à 5%. La distance réservoirs-stations ne semble pas induire une tendance en particulier sur les autres critères. Les performances des différents modèles à simuler des hauts débits sont similaires et restent globalement bonnes. Cependant, sur les bas débits, où l'écart entre débits simulés et débits observés est plus important, GR6J s'avère être le moins adapté.

Au final, nos modèles GR incluant les lacs-réservoirs sont utilisables pour appliquer la méthode de reconstitution de séries de débits naturels.

4.2. Forces et faiblesses des méthodes testées

4.2.1. Bilan sur ouvrage

4.2.1.1. Erreur du bilan hydrologique

Avec les connaissances actuelles insuffisantes du cycle hydrologique et des moyens de mesures dont nous disposons, il est difficile d'obtenir un bilan hydrologique parfait. Nous pouvons voir sur la Figure 15.a que l'amplitude de l'erreur est similaire pour chaque lac. Cependant, en ramenant le volume d'eau à la surface respective de chaque lac (Figure 15.b), nous voyons bien que l'erreur aura plus d'impact sur le lac de Pannecière de 5.2 km² que sur le lac de la Marne dix fois plus étendu. Sur le graphique de gauche, le lac de Pannecière, qui est le seul construit au fil de l'eau et ayant un mode d'alimentation un peu différent (Annexe 3: Figure 32), présente un aspect plus lisse. Les erreurs

semblent avoir un comportement saisonnier similaire avec un pic en juillet suivi d'une baisse jusqu'à décembre puis d'une remontée de janvier à juin.

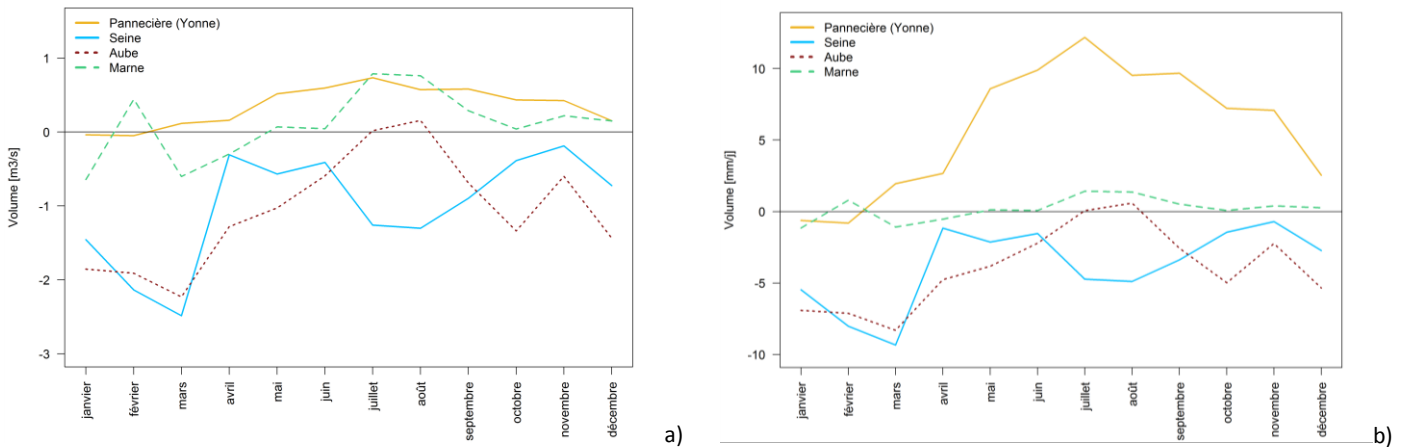


Figure 15 : Régime mensuel de l'erreur journalière sur les quatre lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]), a) en m^3/s et b) en mm/j .

Nous allons dans la suite nous intéresser à l'influence du choix du pas de temps, au choix de l'évaporation et enfin à la prise en compte de l'évolution morphologique saisonnière de nos lacs-réservoirs. Dans chaque partie, nous ne ferons varier qu'un paramètre à la fois. Pour rappel, nos données de base sont l'évapotranspiration d'Oudin, les précipitations issues de SAFRAN et les données d'exploitation (débit entrée, débit sortie, variation de volume) fournies par Seine Grands Lacs.

❖ Choix du pas de temps

En passant d'un pas de temps journalier à un pas de temps mensuel (Figure 16), nous constatons que les régimes de l'erreur journalière ont des courbes similaires. L'application d'un pas de temps plus grand n'entraîne pas systématiquement une amélioration du bilan sur ouvrage comme nous nous y attendions grâce à une compensation des erreurs. Ainsi sur l'Aube, le pas de temps mensuel permet de diminuer l'erreur de janvier à juin, alors que de juillet à décembre, elle est plus forte qu'avec un pas de temps journalier.

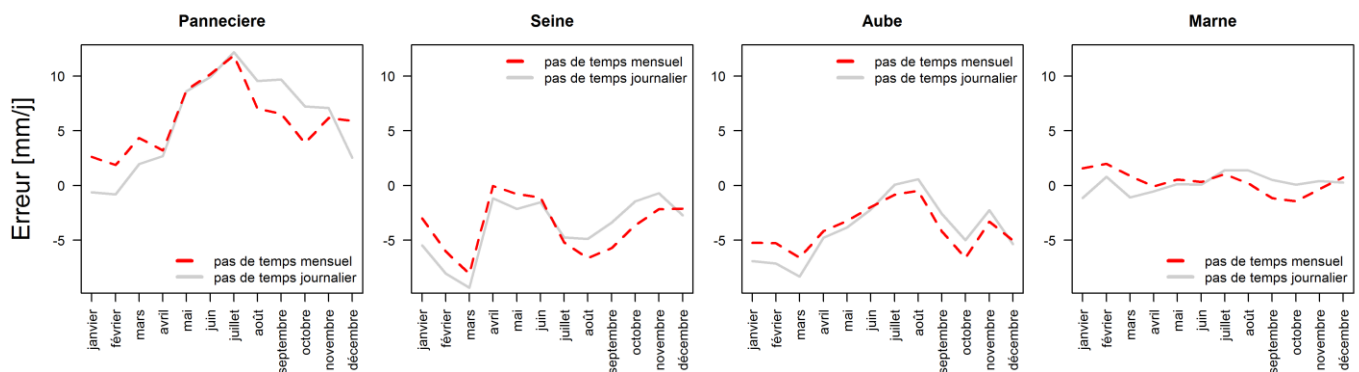


Figure 16 : Régime mensuel de l'erreur journalière selon le choix du pas de temps (période : [P3P4]).

❖ Choix de l'évaporation/ évapotranspiration

Il convient d'utiliser l'évaporation lorsque l'on travaille sur des surfaces d'eau libre. Nous allons dans cette partie comparer notre erreur de bilan obtenue avec l'évaporation potentielle de Sill (1983) à l'évapotranspiration potentielle d'Oudin. Plus de détails sur leurs fondements sont fournis en partie A de l'Annexe 6. Nous avons également une estimation de l'évaporation réelle du lac-

réservoir de la Marne sur la période 2009-2013 (Annexe 6 : Figure 36) grâce à un bac Colorado situé à Giffaumont. Ces valeurs d'évaporation réelle sont comprises entre les valeurs de l'évaporation de Sill et l'évapotranspiration d'Oudin.

L'évaporation de Sill étant plus faible que l'évapotranspiration d'Oudin (Annexe 6 : Figure 35), elle n'apporte une amélioration dans le bouclage du bilan que dans le cas où le bilan est déficitaire comme c'est le cas pour la Seine et l'Aube (Figure 17). Dans les deux autres cas, il est préférable d'utiliser la formule d'Oudin. Nous constatons que l'allure des courbes de régime de l'erreur est similaire en utilisant l'évaporation ou l'évapotranspiration.

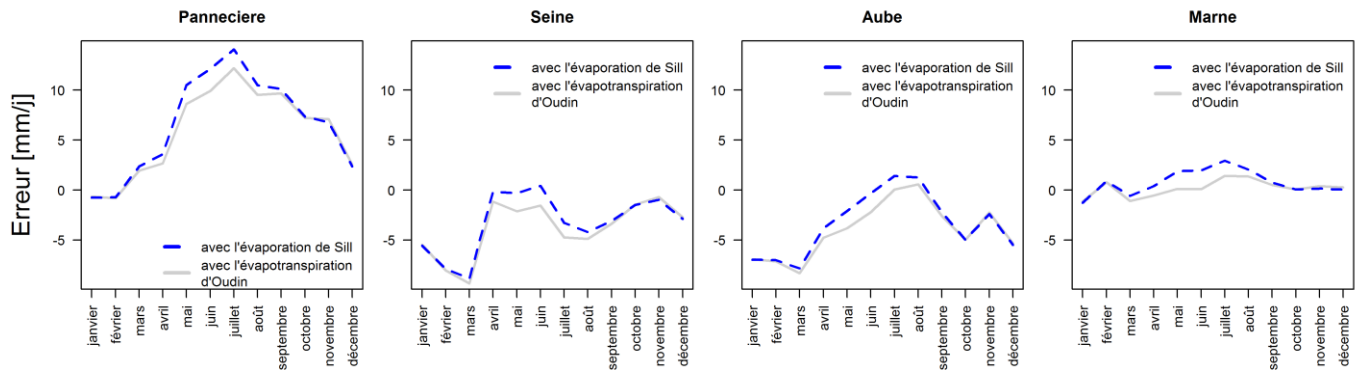


Figure 17 : Régime mensuel de l'erreur journalière selon l'évaporation/évapotranspiration (période : [P3P4]).

❖ Evolution morphologique saisonnière des lacs

Les variations de volume, dues au mode de gestion des lacs-réservoirs, entraînent une variation de leurs surfaces (Annexe 6 : Figure 37). Les surfaces augmentent de novembre à juin (période de remplissage) puis diminuent de juillet à fin octobre (période de vidange). Prendre en compte ces variations affecte l'estimation des volumes précipités directement sur le lac qui auront une courbe similaire à la variation mensuelle de la surface (Annexe 6 : Figure 38). De plus, ayant toujours considéré que la surface constante correspondait à la surface maximale du lac, nous aurons des valeurs d'évaporation et de précipitation plus faible.

Sur la Figure 18, nous pouvons voir que la prise en compte de la variation surfacique affecte surtout l'erreur de fin octobre à mars, lorsque les surfaces des lacs sont alors au plus bas. La pluie ayant un rôle prédominant par rapport à l'évapotranspiration durant cette période et étant plus faible qu'avec une surface constante, nous n'avons une amélioration que dans les cas où les bilans sont largement excédentaires comme c'est le cas pour Pannecière de septembre à décembre. Nous ne notons pas de différence sur la période de juin-juillet, ceci est dû au fait que les lacs ont presque leur taille maximale à cette période.

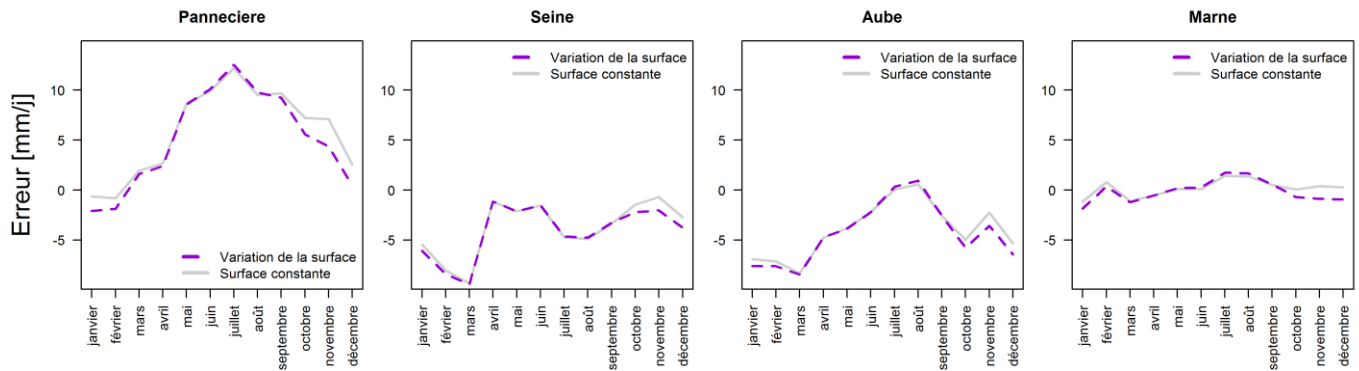


Figure 18 : Régime mensuel de l'erreur journalière selon la variation de la surface (période : [P3P4]).

❖ Conclusion sur l'erreur du bilan sur ouvrage

Nous pouvons conclure qu'aucun des paramètres testés ne permet une amélioration globale du bilan sur ouvrage. Les erreurs de bilan ayant un même ordre de grandeur sur chaque ouvrage et ayant un aspect plus saccadé sur les lacs-réservoirs en dérivation, nous faisons l'hypothèse que les erreurs de mesure en sont la principale origine, comme expliqué dans la partie 2.4.3.

4.2.1.2. Débits négatifs

Une des faiblesses de la méthode de bilan sur ouvrage est l'obtention de débits négatifs. Dans notre cas, ce sont les stations de Blaincourt, Arcis-sur-Aube, Châlons-sur-Marne et Méry-sur-Seine qui sont touchées. Les débits négatifs sont en fait dans l'intervalle d'erreur du bilan sur ouvrage (voir Figure 39 de l'Annexe 6). De plus, l'apparition de ces débits négatifs se situe en période d'étiage. En effet, durant cette période, une erreur sur l'obtention de notre ΔV aura un impact plus important. De plus, les stations ayant des débits négatifs sont les stations les plus en amont. Le débit étant plus important aux stations aval, ΔV et ses erreurs associées y ont un poids moins important. L'apparition de débits négatifs reste cependant assez limitée, avec 3.6% de débits négatifs pour Blaincourt, 0.07% pour Arcis-sur-Aube, 1.46% pour Châlons-sur-Marne et 0.82% pour Méry-sur-Seine et se concentrent sur de courtes périodes.

Afin de ne pas avoir de débits négatifs, Agosta (2007) a utilisé dans ses travaux une méthode pour lisser les débits. Dans notre cas, nous nous limiterons à estimer que les débits négatifs sont nuls dans la suite de nos travaux.

4.2.1.3. Influence du niveau de sophistication de la méthode

La méthode d'Hydratec présente un degré de sophistication bien plus élevé du fait de la correction des débits amont et de l'utilisation d'un modèle de propagation. Nous allons donc voir dans cette partie si nos résultats sont comparables à ceux d'Hydratec. Notre analyse sera cependant limitée par le fait que nous ne connaissons pas les paramètres utilisés par Hydratec pour effectuer son bilan sur ouvrage. Nous avons calculé la proximité de nos résultats à ceux d'HYDRATEC par les critères d'efficacité sélectionnés (cf. partie 3.4) en considérant les simulations d'HYDRATEC comme référence.

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 19.a, nos débits sont très proches de ceux obtenus par Hydratec. Il en est de même lorsque nous comparons le biais et R90 qui sont très proches de la valeur optimale de 1. Comme nous pouvons le voir sur le graphique de R10, nos bas débits sont inférieurs aux bas débits d'Hydratec sur les stations de Châlons-sur-Marne et de Méry-sur-Seine. Ceci peut venir du fait que nous avons obtenu des débits négatifs sur ces stations.

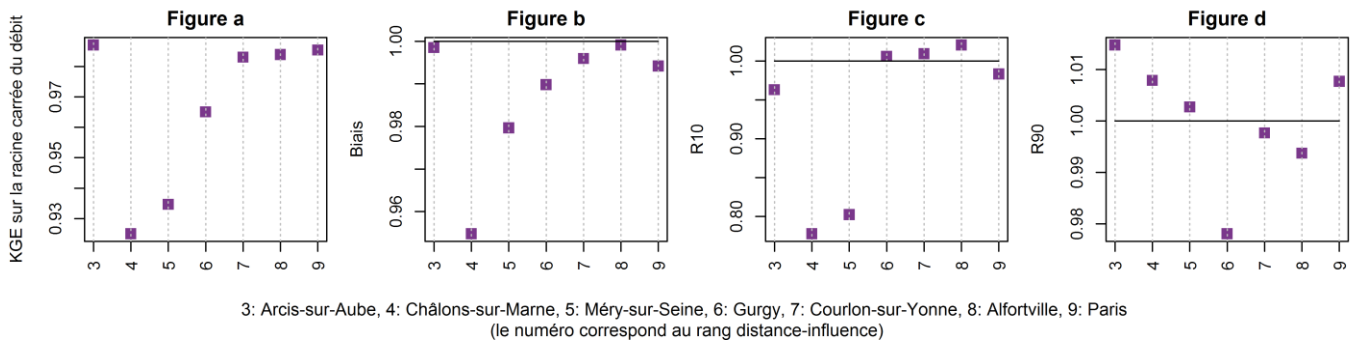


Figure 19 : Comparaison des débits naturalisés par la méthode de bilan sur ouvrage (Q_{sim}) par rapport aux débits naturalisés d'Hydratec ($Q_{réf}$) (période : [P3P4]), suivant quatre critères d'efficacité.

Au final, nos séries de débits obtenus sans modèle de propagation et corrections restent globalement très semblables à celles d'Hydratec, la différence la plus importante se faisant sur les bas débits.

4.2.2. Extension de séries de débits naturels

La méthode d'extension de séries de débits naturels reposant sur l'utilisation de modèles hydrologiques, les forces et faiblesses de cette méthode sont fortement liées au choix du modèle hydrologique utilisé.

4.2.2.1. Influence de la période de calage

La série de débits naturalisés obtenue après calage sur [P1P2] nous servira de série de référence dans notre comparaison. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 20, nos indicateurs (le KGE, le biais, R10 et R90) sont très proches de 1, ce qui nous indique dans notre cas que peu de différences existent entre nos trois séries obtenues après calage sur [P1], [P2] et [P1P2]. Du fait du faible écart existant entre les séries, nous ne notons pas de variabilité significative entre les stations.

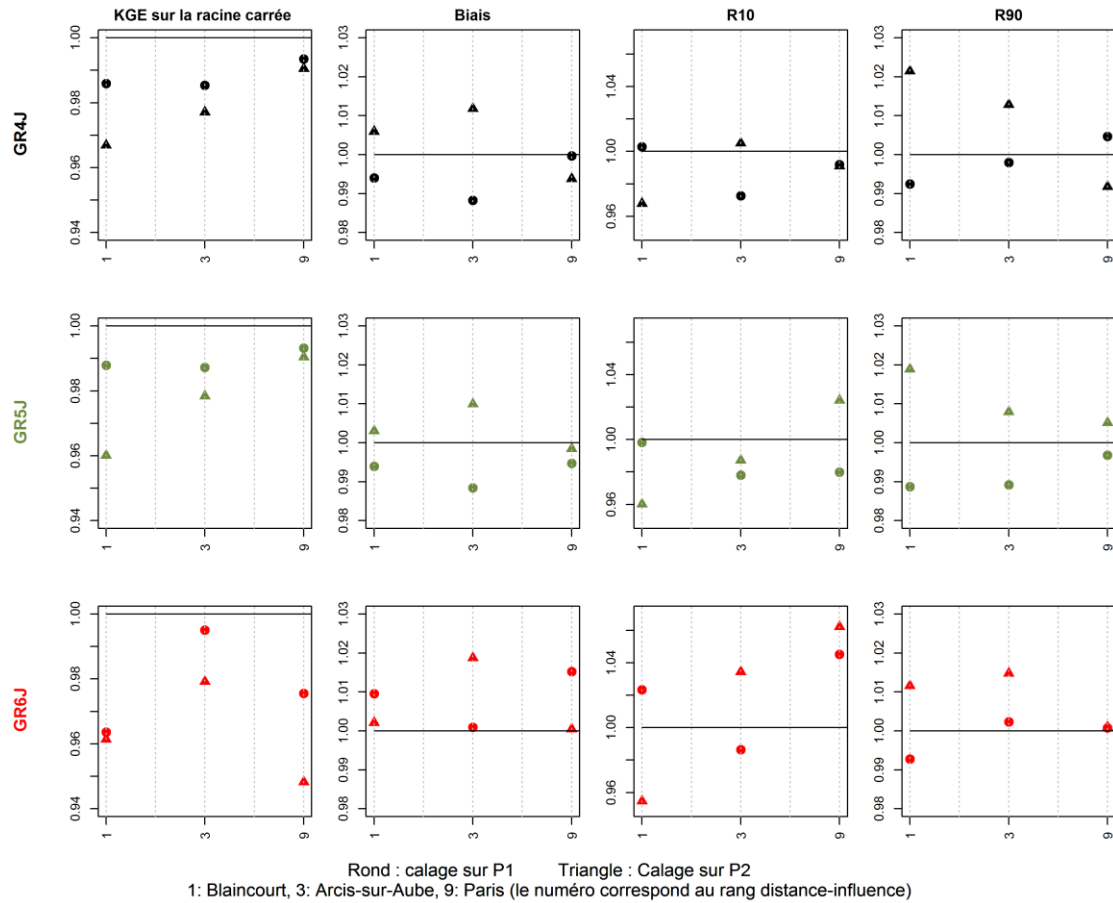


Figure 20 : Comparaison des débits naturalisés par la méthode d’extensions de série de débit après calage sur P1 puis P2, par rapport aux débits naturalisés obtenus après calage sur [P1P2].

4.2.2.2. Intervalle de confiance

Prenons l’exemple des débits obtenus avec GR4J sur la station d’Arcis-sur-Aube (cf. Figure 21), où nous avons en abscisse les débits naturalisés simulés et en ordonné l’erreur multiplicative associée. La borne inférieure, U10, correspond au 10^{ème} quantile de l’erreur relative : pour un débit simulé donné, 10% des erreurs relatives commises pour ce niveau de débit sont inférieures à U10. De même, la borne supérieure, U90, correspond au 90^{ème} quantile de l’erreur relative. Ainsi en choisissant comme intervalle de confiance U10 et U90, d’après le graphique, nous pouvons estimer qu’un débit simulé de 0.1 mm/j aura une erreur relative comprise entre 0.8 et 2.3, c’est-à-dire que la valeur observée correspondante a 80% de chance d’être dans l’intervalle 0.08 et 0.23 mm/j.

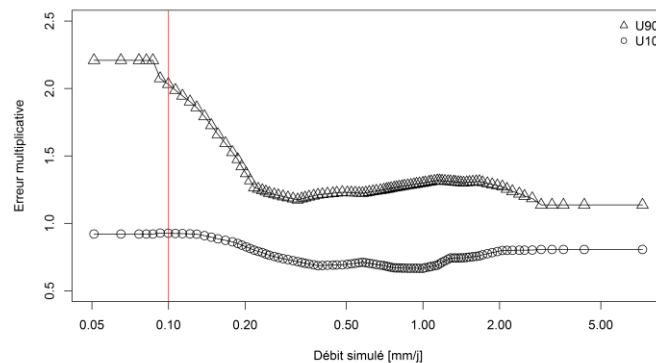


Figure 21 : Quantiles 10% (U10) et 90% (U90) des erreurs multiplicatives obtenues grâce à la méthode QUOIQUE sur la station d’Arcis-sur-Aube avec le modèle GR4J sur la période [P1P2], en fonction du débit simulé.

Nos résultats détaillés (voir Figure 40 de l'Annexe 7) indiquent que toutes nos stations de l'Aube présentent un intervalle d'erreur similaire à celui de la Figure 21. Nous avons globalement une forte incertitude sur les bas débits et un intervalle plus fin sur les hauts débits. Ceci peut être expliqué en partie par le fait que nous avons calé nos modèles sur la racine carrée du débit. Un calage sur les débits inverses aurait donné de meilleures performances sur les bas débits et donc un intervalle d'erreur relative plus faible. Cela s'explique également par la plus grande difficulté à simuler les bas débits avec une précision relative équivalente à celle obtenue sur les hauts débits, du fait de la très forte non linéarité des processus et des erreurs de mesure. Sur l'ensemble de nos stations, aucun modèle ne se distingue des autres par un intervalle de confiance plus fin.

Au final, nous pouvons, grâce à ces résultats, évaluer où se situent les faiblesses et forces de nos modèles pour naturaliser les débits.

4.3. Comparaison des méthodes

4.3.1. Comparaison des méthodes de naturalisation

Nous allons dans cette partie comparer l'ensemble des débits naturalisés obtenus. L'ensemble de ces méthodes n'étant comparable que sur la station amont d'Arcis-sur-Aube et la station aval multi-influencée de Paris, nous ne pouvons avoir qu'un aperçu des différences entre ces méthodes. Nous avons choisis d'inclure également dans notre analyse la station de Blaincourt, bien qu'elle ne dispose pas de débits naturalisés par Hydratec. Cependant, nous avons vu précédemment que notre méthode de bilan sur ouvrage produisait des résultats similaires.

Dans un premier temps, une comparaison sera faite entre chaque série de débits selon nos critères de comparaison, puis dans un deuxième temps, nous verrons si les débits naturalisés se situent à l'intérieur des intervalles de confiances estimés grâce à la méthode QUOIQUE.

❖ KGE sur la racine carrée

Sur la Figure 22, la valeur du KGE sur la racine carrée des débits entre deux séries de débits naturalisés est représentée par une couleur. Plus la case est blanche, plus les séries de débits naturalisés sont similaires. Nous notons tout d'abord que les KGE sont tous supérieurs à 0.80 ce qui manifeste de la similarité des séries de débits naturalisés. La répartition des couleurs étant assez différente d'une station à une autre, aucune tendance ne ressort. Au sein des familles utilisant des modèles hydrologiques, nous constatons que le choix du modèle influe sur la variabilité et ceci particulièrement avec la méthode de reconstitution. Cependant, les écarts viennent avant tout du choix de la méthode utilisée.

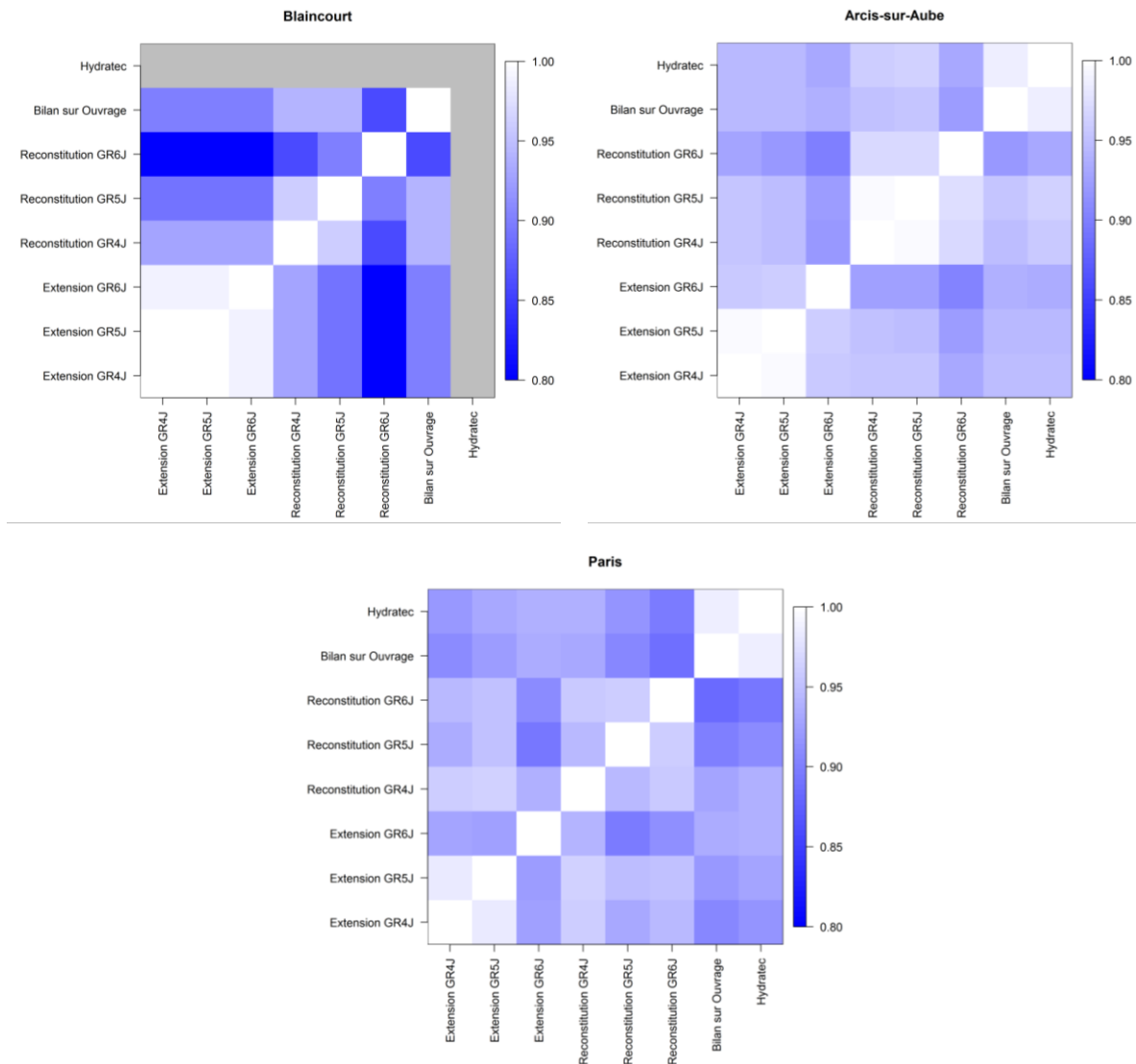


Figure 22 : KGE sur la racine carrée entre les différentes méthodes de naturalisation avec en abscisse le débit naturalisé de référence (période : [P3P4]).

❖ Comparaison des bas débits avec R10

Pour comparer les bas débits entre les stations, sur la Figure 23 plus les cases sont blanches, plus les rapports des bas débits sont proche de un. Une teinte rouge correspond au fait que les débits obtenus par la méthode en ordonnée sont inférieurs à ceux obtenus par la méthode en abscisse. Dans le cas contraire, nous aurons une coloration bleue. Dans le cas des R10, il est normal que nos graphique est un aspect antisymétrique

Comme nous pouvons le voir, l'écart entre les méthodes varient selon les stations. Ainsi sur la station de Blaincourt, nous aurons d'importants écarts entre les méthodes, particulièrement avec les bas débits de la méthode de reconstitution employant GR6J. C'est sur la station intermédiaire d'Arcis-sur-Aube que nous obtenons les écarts les plus faibles entre les méthodes. Comme nous pouvons le constater avec les quadrillages de couleurs qui diffèrent, la comparaison des R10 selon les méthodes conclut tantôt à une surestimation, tantôt à une sous-estimation. Cependant sur les stations de Blaincourt et Arcis-sur-Aube, bien que les écarts soient plus faibles sur cette dernière, nous plus une impression d'homogénéité au-dessus et en dessous de la diagonale avec respectivement un dégradé rouge (sous-estimation) et un dégradé bleu (surestimation).

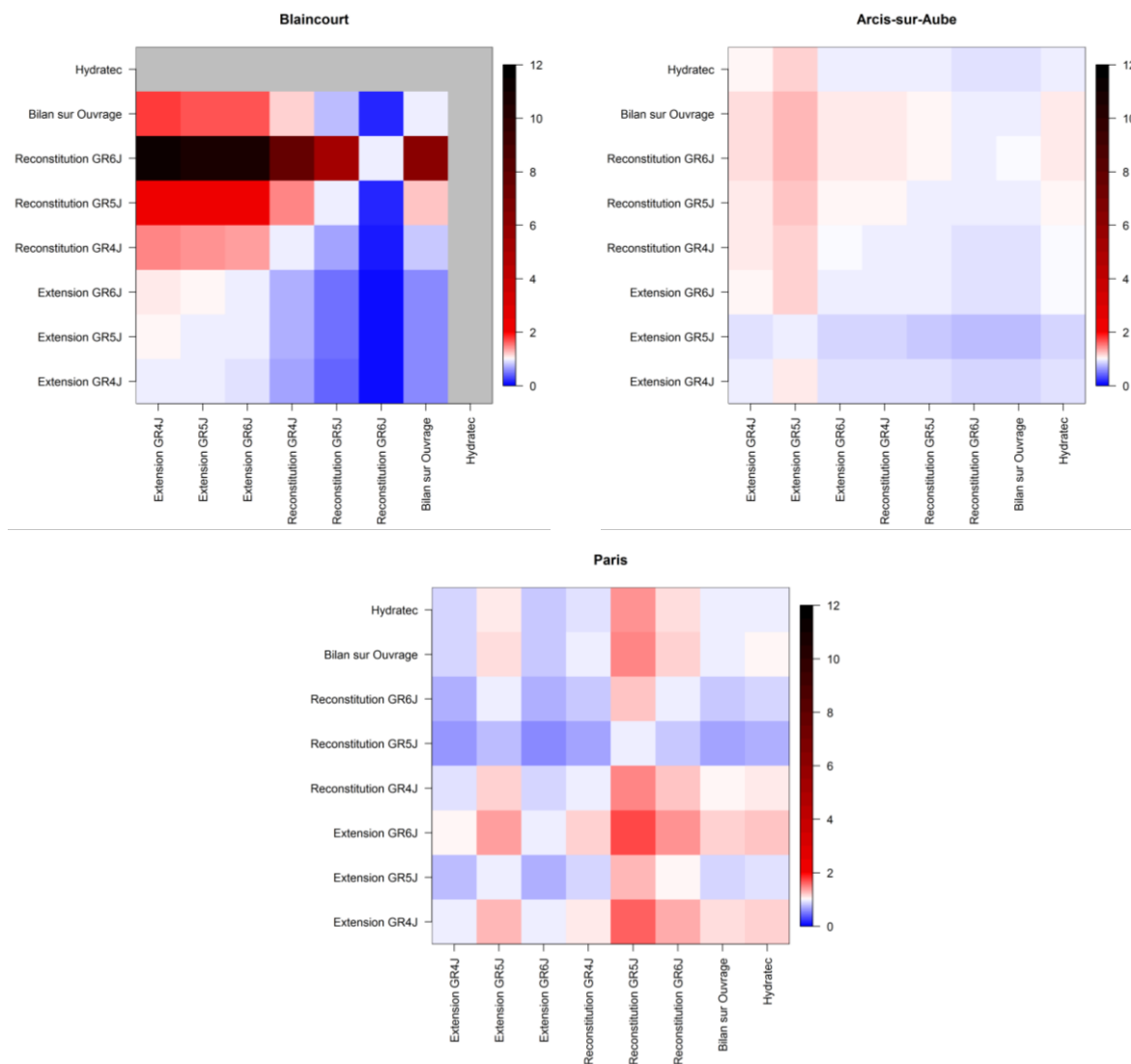


Figure 23 : R10 entre les différentes méthodes de naturalisation avec en abscisse le débit naturalisé de référence (période : [P3P4]).

❖ Comparaison des hauts débits avec R90

Le même code couleur que pour la comparaison des bas débits est utilisée sur la Figure 24. Il est également très délicat d'arriver à une conclusion commune sur les hauts débits. En effet, les écarts entre les hauts débits restent relativement faibles sur la station de Blaincourt avec des différences maximum de 3% et c'est la méthode de bilan sur ouvrage qui affiche les plus grandes différences. Sur la station aval d'Arcis-sur-Aube, les écarts sont bien plus notable avec une différence allant jusqu'à 14% pour la méthode de reconstitution. Et enfin sur la station aval de Paris nous avons les méthodes de bilan sur ouvrage et la méthode d'extension utilisant GR4J qui ressortent, avec un écart de 16% pour cette dernière.

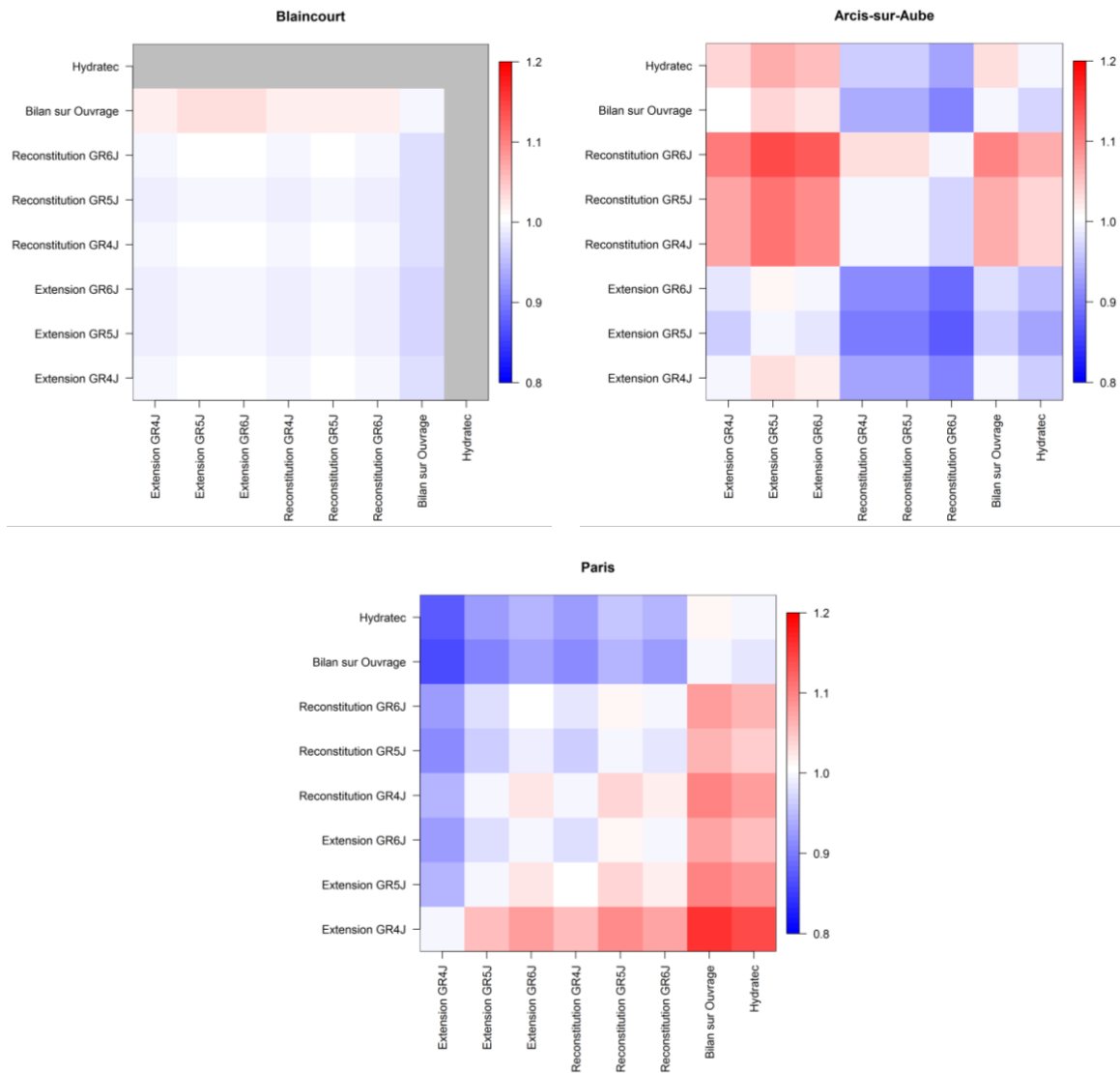


Figure 24 : R90 entre les différentes méthodes de naturalisation avec en abscisse le débit naturalisé de référence (période : [P3P4]).

❖ Taux de couverture

Le taux de couverture indique si une série de débit est contenue ou non dans l'intervalle prédictif obtenu, dans notre cas, avec la méthode QUOIQUE. Il est obtenu selon la formule:

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^N I[Q_{obs}(i)]}{N} \quad \text{Équation 10}$$

où $I[Q_{obs}(i)] = 1$ si $U_{10} < Q_{obs}(i) < U_{90}$, $I[Q_{obs}(i)] = 0$ dans les autres cas.

Nous pouvons voir dans le Tableau 3 le taux de couverture des différentes méthodes selon les intervalles de confiance de la méthode d'extension à la station de Blaincourt. Nous constatons un taux de couvremet relativement faible de 59% en moyenne pour les débits simulés par les autres méthodes.

Pour la station amont d'Arcis-sur-Aube, nous avons des taux de couverture plus satisfaisants. Cependant nous pouvons voir que pour l'intervalle de confiance obtenu avec les débits naturalisés de GR5J, seulement 56.3% des débits naturalisés reconstitués avec GR6J se trouvent dans cet intervalle.

Ces taux de recouvrement plus faibles s'expliquent par le fait qu'avec GR5J nous avons un intervalle de confiance bien plus fin, surtout sur les bas débits, qu'avec GR4J ou GR6J.

Dans le cas de la station aval de Paris, nous pouvons émettre le même constat avec l'intervalle de confiance construit avec GR5J. Ce dernier étant plus fin, surtout sur les bas débits, le taux de recouvrement est faible. Nous constatons de plus que les débits naturalisés avec la méthode de bilan sur ouvrage simple et les débits Hydratec ont un faible taux de recouvrement.

Tableau 3 : Taux de recouvrement obtenus sur les stations de Blaincourt, Arcis-sur-Aube et Paris par rapport aux intervalles de confiances obtenus avec GR4J, GR5J et GR6J sur la période [P3P4].

Station de Blaincourt									Station d'Arcis-sur-Aube								
	Extension			Reconstitution			Bilan sur ouvrage	Hydratec		Extension			Reconstitution			Bilan sur ouvrage	Hydratec
	GR4J	GR5J	GR6J	GR4J	GR5J	GR6J				GR4J	GR5J	GR6J	GR4J	GR5J	GR6J		
	GR4J		0.99	0.93	0.68	0.60				0.51	0.56		GR4J		1		
GR5J	1		0.94	0.64	0.5	0.52	0.57		GR5J	1		0.93	1	1	0.56	0.78	0.83
GR6J	0.96	0.96		0.68	0.61	0.57	0.62		GR6J	0.85	0.90		0.92	0.89	0.83	0.82	0.86

Station de Paris								
	Extension			Reconstitution			Bilan sur ouvrage	Hydratec
	GR4J	GR5J	GR6J	GR4J	GR5J	GR6J		
	GR4J		0.99	0.71	1	0.93		
GR5J	1		0.56	1	1	0.71	0.66	0.58
GR6J	0.77	0.52		0.61	0.31	0.80	0.13	0.13

4.3.2. Impacts des lacs-réservoirs sur le régime naturel du bassin de la Seine

Une comparaison entre les débits naturalisés et les débits influencés observés permet d'évaluer l'impact des lacs-réservoirs sur les débits des stations aval. Nous allons chercher à voir dans cette partie si les débits naturalisés obtenus selon différentes méthodes aboutissent à une conclusion commune sur l'impact des lacs-réservoirs sur le régime hydrologique global, les hauts débits et les bas débits.

❖ Régime hydrologique général

Nous avons sur la Figure 25 le KGE sur la racine carrée des débits naturalisés par rapport aux débits influencés observés. Les valeurs en abscisse correspondant à des rangs de stations et non à des valeurs explicites, l'utilisation de courbes permet avant tout une meilleure visualisation des résultats et ne permet pas une analyse arithmétique. La non-continuité des courbes de la méthode d'extension de série de débits s'explique par le fait que la méthode n'est applicable que sur les stations de Blaincourt, Arcis-sur-Aube et Paris.

Nous pouvons faire le constat qu'avec toutes les méthodes, nous avons un KGE bas pour les stations amont et un KGE proche de 1 pour les stations le plus à l'aval. Ceci reflète le fait que le régime hydrologique des stations aval est moins altéré par la présence des lacs-réservoirs. Sur les stations

intermédiaires, où ont pu être appliquées les méthodes de reconstitution et de bilan sur ouvrage, les variations des courbes sont similaires.

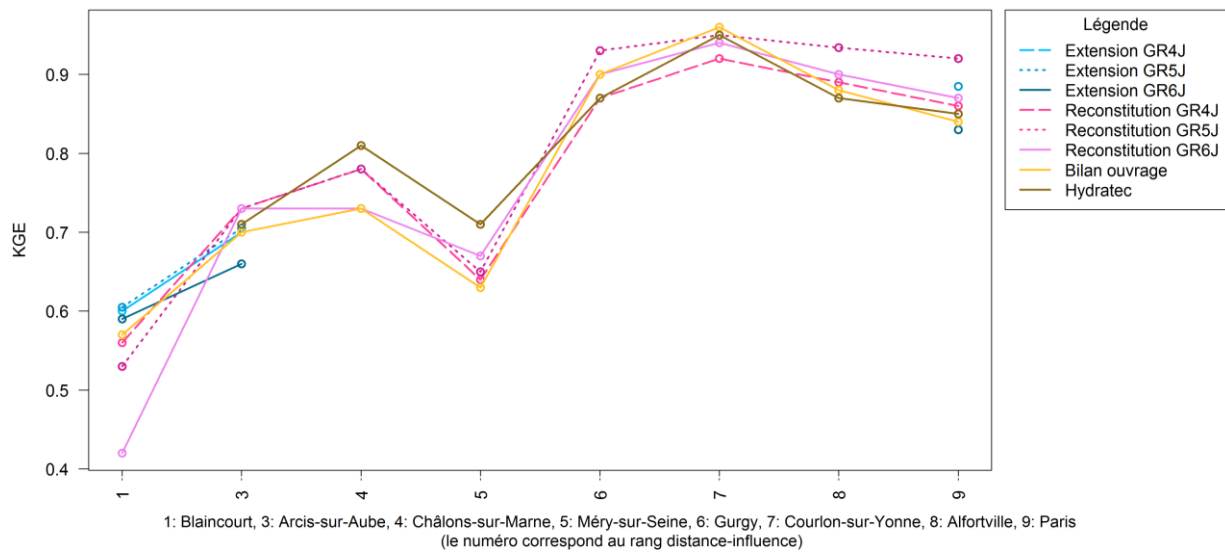


Figure 25 : KGE sur la racine carrée entre les débits naturalisés et les débits influencés de référence de la Banque HYDRO sur les stations du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).

❖ Bas débits

Les ratios des bas débits naturalisés sur les bas débits influencés observés restant inférieur à 1 (Figure 26), toutes les méthodes arrivent à la conclusion que la présence de lacs-réservoirs augmente la valeur des bas débits à l’aval, ce qui est cohérent avec l’objectif de soutien d’étéage des ouvrages.

Pour la méthode d’extension, il est difficile de dégager une tendance de par les faibles écarts entre les R10 et le petit nombre de stations où la méthode est appliquée. Les résultats des autres méthodes montrent que, comme pour le KGE, l’influence est plus importante sur les stations amont et tend à s’amoinrir sur les stations aval. Bien que les tendances soient les mêmes, nous constatons entre les valeurs de R10 à une même station des écarts importants selon le choix de la méthode de naturalisation. De plus, au sein des mêmes familles de naturalisation, d’importants écarts peuvent exister selon le choix du modèle utilisé ou le degré de sophistication de la méthode.

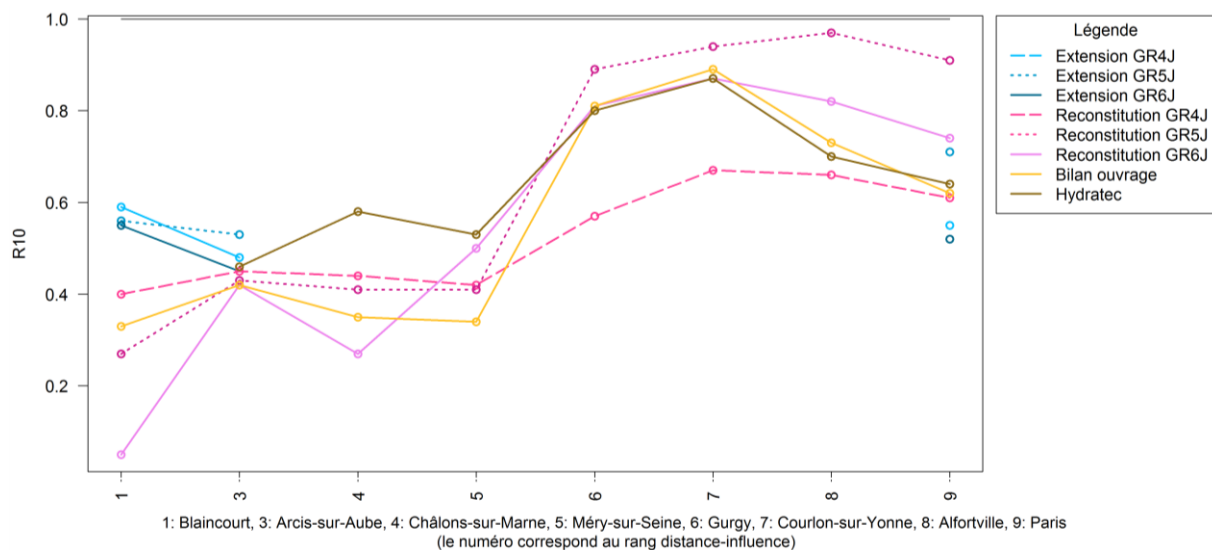


Figure 26 : R10 entre les débits naturalisés et les débits influencés de référence de la Banque HYDRO sur les stations du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).

❖ Hauts débits

Un des principaux rôles des lacs-réservoirs de la Seine est d'écarter les crues. Un ratio supérieur à 1, correspondant au fait que les hauts débits influencés soit inférieurs aux hauts débits naturalisés, pouvait être attendu. Or sur la Figure 27, nous constatons qu'avec la méthode d'extension et de reconstitutions nous arrivons à la conclusion inverse qui est dans notre cas incohérente. Ceci peut être dû à l'utilisation de nos modèles hydrologiques et à l'erreur induite par ces derniers.

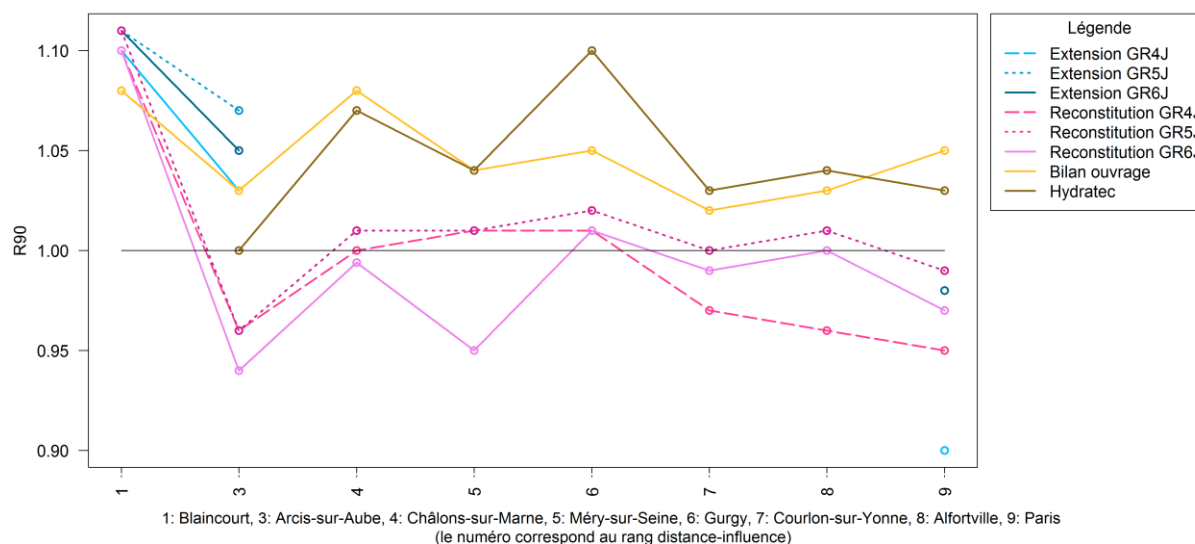


Figure 27 : R90 entre les débits naturalisés et les débits influencés de référence de la Banque HYDRO sur les stations du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).

❖ Régime journalier interannuel

Nous avons tracé sur un même graphique les régimes hydrologiques interannuels des débits naturalisés et du débit influencé observé sur les stations de Blaincourt et de Paris (Figure 28). En Annexe 8 sont présentés les régimes sur l'ensemble des stations étudiées. Tout d'abord, nous pouvons noter que les régimes naturalisés, obtenus selon différentes méthodes, ont des allures très similaires. Ils s'accordent donc tous sur la temporalité du régime naturel avec de début juin à fin septembre une période de basses eaux bien marqué suivi de début octobre à fin mai d'une période de hautes eaux. La différence qu'il existe entre les régimes naturalisés est surtout volumique.

Nous constatons que sur les stations amont, il y a une différence bien marquée entre les régimes de débits naturalisé et le régime des débits observés influencé, et plus particulièrement sur la période de basses eaux. Sur les stations aval, de Gurgy à Paris (soit de l'indice distance-influence 6 à 9), durant cette période les écarts entre régimes naturalisés et régimes influencés sont bien plus faibles. Sur la période de hautes eaux, le régime influencé des stations aval est confondu avec les régimes naturalisés. Alors que, comme nous pouvons le voir sur le graphique de Blaincourt, le régime influencé des stations amont est bien plus bas que les régimes naturalisés. La comparaison des régimes journaliers interannuels permet de mieux expliciter le rôle d'écarterment des crues des lacs-réservoirs. De manière générale, plus la distance ente une station et les lacs-réservoirs l'influençant est importante, moins son régime hydrologique est altéré par ces derniers.

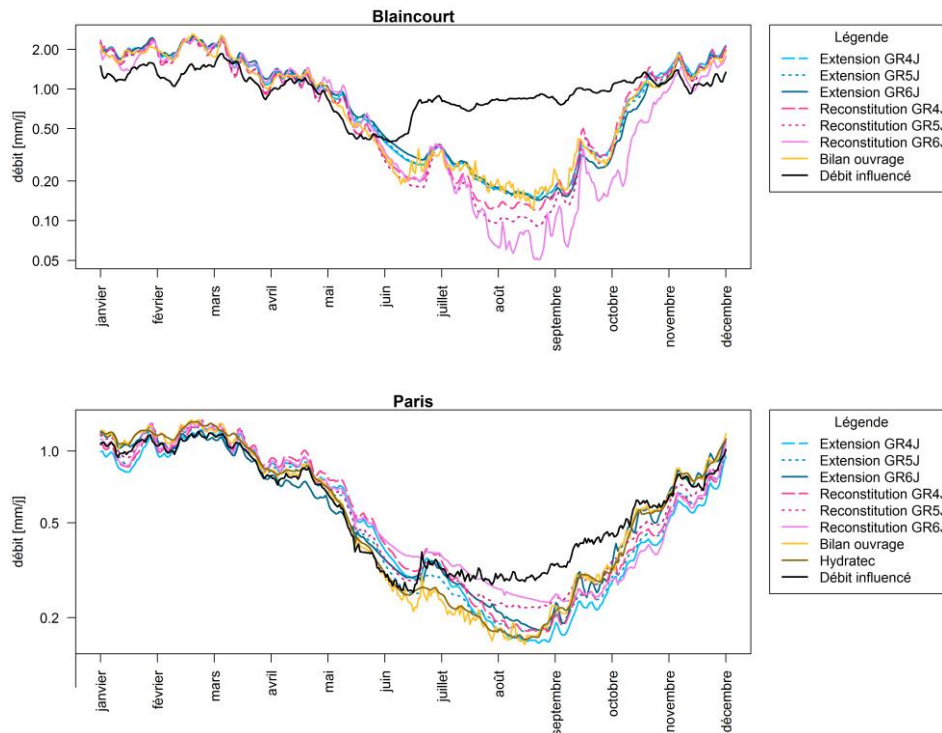


Figure 28 : Régime journalier interannuel de l'Aube à Blaincourt et de la Seine à Paris (période : [P3P4]).

4.3.3. Couplage de différentes méthodes de naturalisation

Le choix de l'application d'une méthode de naturalisation dépend avant tout de la disponibilité des données sur l'ensemble de la période d'étude. Or, bien souvent les hydrologues n'ont accès qu'à des courtes séries de données, acquises lors de campagnes de mesures, ou estiment que leurs données ne sont pas exploitables sur l'ensemble de la période d'étude. Le couplage de différentes méthodes de naturalisation apparaît donc souvent comme une solution pour obtenir des débits naturalisés sur l'ensemble de la période d'étude. Dans notre cas, la méthode d'extension sera appliquée aux séries de débits naturalisés obtenus selon les méthodes de reconstitution et de bilan sur ouvrage. Le but étant avant tout de savoir si un couplage de ces méthodes est possible, la méthode d'extension ne sera appliquée qu'avec le modèle GR5J.

Dans un premier temps, nous calerons le modèle de bassin naturel, GR5J, sur les débits naturalisés de la période P3 afin de simuler des débits naturalisés par la méthode d'extension sur la période P4. Nous comparerons alors ces débits simulés aux débits naturalisés. Puis dans un deuxième temps, l'opération sera répétée en calant sur P4 et en validant sur P3.

En comparant les KGE obtenus sur la période de calage et de validation (Figure 29), nous voyons que nous avons une faible chute des performances, ce qui signifie que malgré l'utilisation de débits naturalisés, notre modèle est robuste. De plus, sur la période de calage, tous les KGE sont supérieurs à 0.88. Cela signifie qu'en calant sur une série de débits naturalisés notre modèle est capable de simuler des débits très proches de ces derniers.

Nous pouvons voir sur la Figure 30 que nos valeurs sont très proches de la diagonale, nos bas débits naturalisés sont donc presque identiques aux bas débits obtenus en appliquant la méthode d'extension. Bien que légèrement plus éloignés de la diagonale, le constat est le même pour les hauts débits (Figure 31).

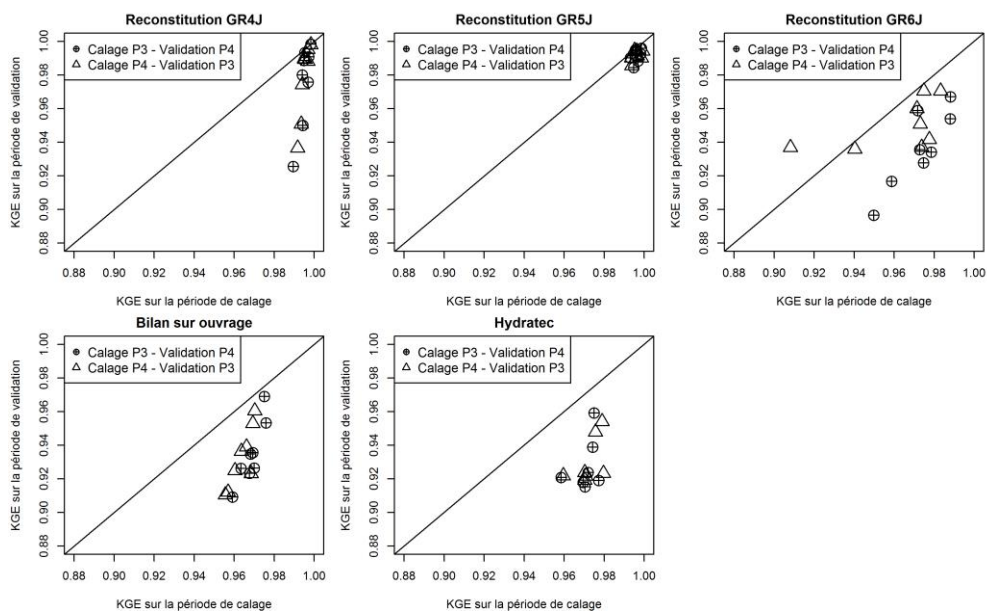


Figure 29 : KGE sur la racine carrée des débits obtenus par la méthode d'extension de séries de débits naturalisés avec GR5J (périodes : [P3,P4]).

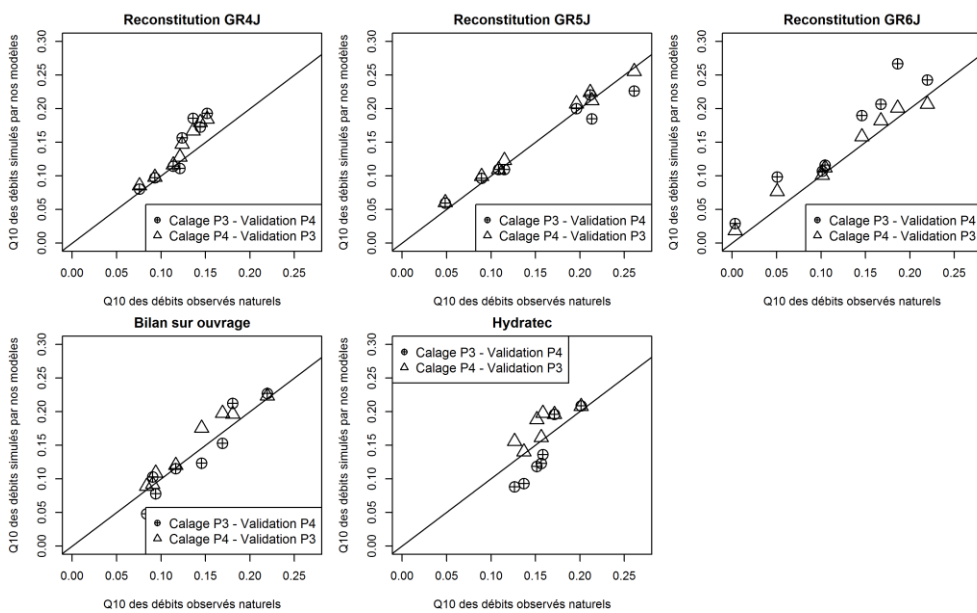


Figure 30 : Q10 des débits obtenus par la méthode d'extension de séries de débits naturalisés avec GR5J par rapport aux Q10 naturalisés par les différentes méthodes (périodes : [P3,P4]).

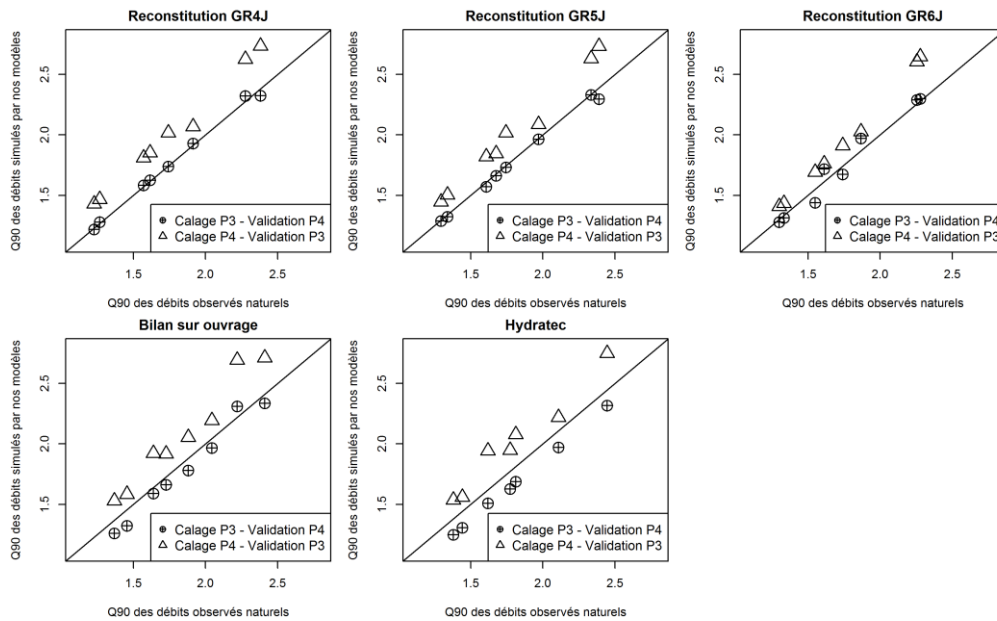


Figure 31 : Q90 des débits obtenus par la méthode d'extension de séries de débits naturalisés avec GR5J par rapport aux Q90 naturalisés par les différentes méthodes (périodes : [P3,P4]).

Au final nous pouvons conclure que la méthode d'extension est dans notre cas parfaitement applicable aux séries de débits naturalisés par d'autres méthodes. Cependant chaque étape ajoutée à la chaîne de calcul menant à la naturalisation risque d'accroître le taux d'incertitude de nos débits naturalisés.

Conclusion

L'objectif de ce stage était d'amorcer une réflexion sur l'évaluation et la comparaison des méthodes de naturalisation des débits, en se basant sur le cas du bassin versant de la Seine.

Nous avons pu dans ce cadre appliquer trois méthodes de naturalisation venant de deux des trois grands groupes identifiés : les méthodes d'extension et de reconstitution de séries de débits, et la méthode de bilan sur ouvrage. Leur application sur le bassin amont de la Seine a permis de mettre en évidence que le bouclage du bilan hydrologique, au pas de temps journalier ou mensuel, est très délicat, du fait de la fiabilité de nos mesures et de nos connaissances du cycle hydrologique. Les erreurs de bilan induisent donc une incertitude sur nos débits naturalisés par la méthode de bilan sur ouvrage. La méthode d'extension de série de débits étant basée sur l'utilisation de modèles hydrologiques, la qualité de la naturalisation est fortement liée à la capacité de ce dernier à simuler des débits naturels à long terme. Quant à la méthode de reconstitution, utilisant également l'estimation de variation des réservoirs, elle est aussi dépendante de l'erreur de cette dernière. De plus les résultats reposent sur la capacité des modèles hydrologiques à reproduire des débits influencés.

La comparaison des différents débits naturalisés sur trois stations du bassin de la Seine a montré que les différentes méthodes produisent des débits naturalisés similaires. Cependant, pour l'estimation des bas débits, de grande disparité existe entre les méthodes. Néanmoins, il est rassurant de constater qu'en effectuant une comparaison entre les différents débits naturalisés et débits influencés nous arrivons à une conclusion commune sur l'impact des lacs-réservoirs : plus l'on va à l'aval, plus l'impact des lacs-réservoir est dilué. Nos résultats mettent bien en évidence le rôle des lacs-réservoirs sur le soutien des étiages. Cependant, l'analyse sur les hauts débits est plus délicate, le rôle des lacs-réservoirs paraît moindre sur ces derniers.

L'utilisation de débits naturalisés pour l'application de la méthode d'extension de série de débits ayant conduit à de bons résultats, le développement et l'utilisation de méthodes hybrides de naturalisation pourrait être envisagé par la suite.

Bien que ces comparaisons aient été menées sur un faible échantillon de stations, cette première analyse nous a permis d'avoir un aperçu des différences entre les méthodes. Ces dernières étant dépendantes de nombreux paramètres tels que le choix du modèle hydrologique utilisé ou encore la qualité des données, une comparaison plus poussée devrait faire apparaître leur importance. Bien que les conditions à réunir soient importantes pour l'application de toutes les méthodes, il serait intéressant de travailler sur un échantillon d'étude plus important afin de faire ressortir des conclusions plus générales.

Bibliographie

- Agosta C. (2007)** - Naturalisation des débits et modélisation hydrologique sur des sous-bassins versant de la Garonne à Lamagistère - (Mémoire de Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie - Parcours Hydrologie-hydrogéologie, Université Pierre et Marie Curie, Paris, Laboratoire National en Hydraulique et Environnement, EDF Recherche et développement, Chatou.), EDF: 51 p.
- Andréassian V., J. Lerat, N. Le Moine, et al. (2012)** - Neighbors: Nature's own hydrological models.- *Journal of Hydrology* 414–415-49-58 p.- doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.10.007.
- BCEOM (1999)** - Etude du bilan hydrologique du Lac-réservoir Seine et étude hydraulique des canaux de restitution.- (Rapport), Les Grands Lacs de Seine: 62 p. - Rapport numéro: HEN 90723 M.
- Bourgin F. (2014)** - Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants -. *Doctorat Hydrologie*, AgroParisTech, Irstea.
- Constantz J. et H. Essaid (2007)** - Influence of groundwater pumping on streamflow restoration following upstream dam removal.- *Hydrological Processes* 21(21)-2823-2834 p.- doi: 10.1002/hyp.6520.
- Coron L., V. Andréassian, C. Perrin, et al. (2012)** - Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments.- *Water Resources Research* 48(5)p.- doi: 10.1029/2011WR011721.
- De Girolamo A. M., A. Lo Porto, G. Pappagallo, et al. (2015)** - Assessing flow regime alterations in a temporary river - The River Celone case study.- *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 63(3)-263-272 p.- doi: 10.1515/johh-2015-0027.
- Dorchies D., G. Thirel, M. Jay-Allemand, et al. (2014)** - Climate change impacts on multi-objective reservoir management: case study on the Seine River basin, France.- *International Journal of River Basin Management* 12(3)-265-283 p.- doi: 10.1080/15715124.2013.865636.
- Dunn S. M. et R. C. Ferrier (1999)** - Natural flow in managed catchments: A case study of a modelling approach.- *Water Research* 33(3)-621-630 p.- doi: 10.1016/S0043-1354(98)00268-1.
- Eaucea (2013)** - Gestion quantitative de la ressource en eau du bassin versant de l'Aude. Etude de détermination des volumes prélevables.- (Rapport d'étude), eaucea. **3**: 111 p.
- EU (2015)** - Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive.- (Technical Report - 2015 - 086), European Union. **Guidance Document No. 31**: 108 p.
- Fantin-Cruz I., O. Pedrollo, P. Girard, et al. (2015)** - Effects of a diversion hydropower facility on the hydrological regime of the Correntes River, a tributary to the Pantanal floodplain, Brazil.- *Journal of Hydrology* 531-810-820 p.- doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.10.045.
- Gupta H. V., H. Kling, K. K. Yilmaz, et al. (2009)** - Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling.- *Journal of Hydrology* 377(1–2)-80-91 p.- doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
- Hernández-Henríquez M. A., T. J. Mlynowski et S. J. Déry (2010)** - Reconstructing the natural streamflow of a regulated river: A case study of la grande rivière, Québec, Canada.- *Canadian Water Resources Journal* 35(3)-301-316 p.- doi: 10.4296/cwrj3503301.
- Hirsch R. M. (1982)** - A comparison of four streamflow record extension techniques.- *Water Resources Research* 18(4)-1081-1088 p.- doi: 10.1029/WR018i004p01081.
- Hosseinpour A., L. Dolcine et M. Fuamba (2014)** - Natural flow reconstruction using Kalman filter and water balance-based methods I: Theory.- *Journal of Hydrologic Engineering* 19(12)-8 p.- doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000977.
- Hosseinpour A., L. Dolcine et M. Fuamba (2014)** - Natural flow reconstruction Using Kalman filter and water balance-based methods II: Case studies, results, and discussion.- *Journal of Hydrologic Engineering* 19(12)-12 p.- doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.
- Hydratec (2011)** - Actualisation de la base de données des débits journaliers 'naturalisés' - Phase 2.- (Rapport): 31 p. - Rapport numéro: 26895- LME/TL.
- Jones P. D., D. H. Lister et E. Kostopoulou (2004)** - Reconstructed river flow series from 1860s to present.- (Rapport pour l'agence de l'environnement) Bristol: 74 p.
- Klemes V. (1986)** - Operational testing of hydrological simulation models.- *Hydrological Sciences Journal* 31(1)-13-24 p.- doi: 10.1080/02626668609491024.
- Li S., L. Xiong, L. Dong, et al. (2013)** - Effects of the Three Gorges Reservoir on the hydrological droughts at the downstream Yichang station during 2003–2011.- *Hydrological Processes* 27(26)-3981-3993 p.- doi: 10.1002/hyp.9541.

- Maurel F., T. Lepelletier, J. Moreau, et al. (2008)** - Prospective assessment in water consumption-resources in Seine-Normandie basin.- *Houille Blanche*(5)-45-52 p.- doi: 10.1051/lhb:2008053.
- Mittal N., A. G. Bhawe, A. Mishra, et al. (2015)** - Impact of Human Intervention and Climate Change on Natural Flow Regime.- *Water Resources Management*-685 - 699 p.- doi: 10.1007/s11269-015-1185-6.
- Naik P. K. et D. A. Jay (2005)** - Estimation of Columbia River virgin flow: 1879 to 1928.- *Hydrological Processes* 19(9)-1807-1824 p.- doi: 10.1002/hyp.5636.
- Oudin L., V. Andréassian, T. Mathevet, et al. (2006)** - Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations.- *Water Resources Research* 42(7)p.- doi: 10.1029/2005WR004636.
- Oudin L., V. Andréassian, C. Perrin, et al. (2008)** - Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments.- *Water Resources Research* 44(3)p.- doi: 10.1029/2007WR006240.
- Oudin L., F. Hervieu, C. Michel, et al. (2005)** - Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling.- *Journal of Hydrology* 303(1-4)-290-306 p.- doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026.
- Payan J. L. (2007)** - Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit -. *Doctorat de l'ENGREF Science de l'eau, AgroParisTEch, Cemagref.*
- Peters D. L. et T. D. Prowse (2001)** - Regulation effects on the lower Peace River, Canada.- *Hydrological Processes* 15(16)-3181-3194 p.- doi: 10.1002/hyp.321.
- Peters D. L., T. D. Prowse, A. Pietroniro, et al. (2006)** - Flood hydrology of the Peace-Athabasca Delta, northern Canada.- *Hydrological Processes* 20(19)-4073-4096 p.- doi: 10.1002/hyp.6420.
- Poff N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, et al. (1997)** - The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration.- *BioScience* 47(11)-769-784 p.- doi: 10.2307/1313099.
- Prats J. et P.-A. Danis (2015)** - Optimisation du réseau national de suivi pérenne in situ de la température des plans d'eau : apport de la modélisation et des données satellitaires.- (Rapport Final), Irstea & Onema: 93 p.
- Pushpalatha R., C. Perrin, N. Le Moine, et al. (2011)** - A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation.- *Journal of Hydrology* 411(1-2)-66-76 p.- doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.09.034.
- Pushpalatha R., C. Perrin, N. L. Moine, et al. (2012)** - A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations.- *Journal of Hydrology* 420-421-171-182 p.- doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.055.
- Sauquet E. (2009)** - Climat et aménagement de la Garonne : Quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030 ? - (Rapport de fin de contrat), Cemagref 149 p.
- Sill B. L. (1983)** - Free and Forced Convection Effects on Evaporation.- *Journal of Hydraulic Engineering* 109(9)-1216-1231 p.- doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:9(1216).
- Vidal J. P., E. Martin, L. Franchistéguy, et al. (2010)** - A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system.- *International Journal of Climatology* 30(11)-1627-1644 p.- doi: 10.1002/joc.2003.
- Viennot P. et E. Ledoux (2006)** - Influence de l'augmentation des prélèvements anthropiques en formation aquifères sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Seine, Ecole des Mines de Paris, Centre de Géosciences: 106 p. - Rapport numéro: R060713PVIE.
- Wallace R. B. et J. T. Pavloski (1988)** - Assessing impacts of irrigation on streamflow.- *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 114(2)-211-225 p.- doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1988)114:2(211).
- Wen L. (2009)** - Reconstruction natural flow in a regulated system, the Murrumbidgee River, Australia, using time series analysis.- *Journal of Hydrology* 364(3-4)-216-226 p.- doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.10.023.
- Wu F. C., C. F. Chang et J. T. Shiau (2015)** - Assessment of flow regime alterations over a spectrum of temporal scales using wavelet-based approaches.- *Water Resources Research* 51(5)-3317-3338 p.- doi: 10.1002/2014WR016595.
- Wurbs R. A. (2006)** - Methods for developing naturalized monthly flows at gaged and ungauged sites.- *Journal of Hydrologic Engineering* 11(1)-55-64 p.- doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:1(55).

Package R:

- Coron, L., Perrin, C., Delaigue, O., Thirel, G. and Andréassian, V. (in prep.):** airGR: A suite of lumped hydrological models in an R-package. *Environmental Modelling and software.*
- Coron, L., Perrin, C., Michel, C. (2016):** airGR: Suite of GR hydrological models for precipitation-runoff modelling. *R package version 1.0.1* (<http://webgr.irstea.fr/modeles/?lang=en>).

Annexes

Annexe 1 : Travaux utilisant la méthode de bilan sur ouvrage.

Référence	Bassin	Influences	Objectifs principaux des influences	Objectifs de l'étude
Wallace et al. (1988)	Petits cours d'eau dans le Michigan (Etats-Unis) (site de 80 m ²)	Prélèvements (canaux, puits)	Irrigation	Evaluer l'impact de l'irrigation afin de prendre de meilleures décisions sur le management de la ressource en eau.
Dunn et al. (1999)	Bassin de la rivière Caron en Ecosse	Réservoirs, prélèvements et transferts	Alimentation en eau potable	Amélioration de la gestion d'eau. Bilan en eau effectué grâce à un modèle de gestion en eau puis couplé à un modèle hydrologique.
Peters et al. (2001) Peters et al. (2006)	Peace River dans le bassin du Mackenzie (Canada)	Barrage, Retenue de 28,568 km ² (Great Slave Lake)	Hydroélectricité	Naturalisation des débits pour une analyse différenciée des impacts du climat et des influences de l'ouvrage.
Naik et al. (2005)	Rivière Columbia	Prélèvements, barrage	Irrigation et hydroélectricité	Comprendre et séparer les effets anthropogéniques et climatiques sur la rivière.
Wurbs (2006)	23 bassins versants au Texas (Etats-Unis)	Ensemble d'influences variées	Objectifs multiples	Estimation des débits naturels sur le Texas pour créer différents scénarios sur le management de la ressource en eau. Utilisation des débits naturalisés pour estimer les débits naturels de sites non jaugés.
Agosta (2007) Sauquet (2009)	Garonne (France)	Barrages, prélèvements et transferts interbassins	Irrigation et hydroélectricité	Evaluation du comportement naturel du bassin versant pour une quantification des impacts des changements globaux futurs
Maurel et al. (2008) (Hydratec)	Bassin de la Seine-Normandie (France)	Réservoirs et prélèvements	Alimentation en eau potable, Irrigation, Protection en cas de crues et soutien des étiages	Bilan prospectif besoins-ressources pour la période 2015-2025.

Hydratec (2011)	Bassin de la Seine (France)	Barrages-réservoirs	Protection en cas de crues et soutient des étiages	Construction de séries de débits naturalisées.
Eaucea (2013)	Bassin versant de l'Aude (France)	Barrage-réservoirs, Prélèvements, Transfert interbassins.		Détermination du débit naturel afin de quantifier les volumes percevables.
Fantin-Cruz et al. (2015)	Bassin de la rivière Correntes (Brésil)	Barrage –réservoir de 14.5 km ²	Hydroélectricité	Etudier les impacts de la production hydroélectrique sur le régime hydrologique de la rivière Correntes.
Wu et al. (2015)	Réservoir de Feitsui (nord de Taïwan)	Barrages-réservoirs, Prélèvements	Hydroélectricité, consommation, contrôle des inondations	Mesure de l'altération des régimes hydraulique via la méthode de "the wavelet power spectrum (WPS) series".

Annexe 2 : Travaux utilisant la méthode d'extension de série de débit ou de reconstitution de séries de débits.

Référence	Bassin	Influences	Objectifs principaux des influences	Objectifs de l'étude	Modèle hydrologique	Commentaires
Dunn et al. (1999)	Bassin de la rivière Caron en Ecosse	Réservoirs, prélèvements et transferts	Alimentation en eau potable	Amélioration de la gestion d'eau.	DIY (modèle à base semi-physique, distribué, Δt : journalier)	Calcul de bilan sur ouvrage implémenté à un modèle hydrologique.
Jones (2004)	15 bassins versants du Royaume-Unis			Reconstruire les séries de débits de 1860 à 2002.	Modèle de Wright (modèle empirique)	Extension de séries de débits naturalisés.
Agosta (2007)	Garonne (France)	Barrages, Prélèvements, Transferts interbassins	Hydroélectricité	Evaluation du comportement naturel du bassin versant pour une quantification des impacts des changements globaux futurs.	CEQUEAU (modèle conceptuel, semi-distribué, Δt : journalier)	Extension de séries de débits naturalisés et naturels.
Constantz et al. (2007)	Bassins Etats-Unis	Barrage et prélèvement de la nappe phréatique		Evaluer les impacts combinés d'un barrage et des prélèvements à la nappe phréatique sous différents climat (humide, semi-aride, aride).	MODFLOW-2000, modèle d'écoulement de l'eau souterraine incluant les échange avec la rivière (Δt : mensuel)	Reconstruction de séries de débits naturels a priori sans calage.
Wen (2009)	Bassin de la rivière Murrumbidgee (Australie)	Barrages et seuils		Proposition d'une méthode pour calculer le débit naturel d'une rivière.	Régression multiple	Extension de séries de débits naturels grâce à une relation établie entre le débit, les températures maximales et les précipitations sur la période pré-influence.
Li et al. (2013)	Fleuve Yangtze (Chine)	Barrage des trois Gorges	Hydroélectricité	Quantification de l'effet du barrage sur les étiages à l'aval.	TPMWB (modèle à base physique, Δt : mensuel)	
Dorchies et al. (2014)	Bassin de la Seine	Barrage-réservoirs		Adapter la gestion de l'eau aux futurs changements climatiques.	TGR (Transfer with GR model) GR4J	

Hosseinpour et al. (2014)	Bassin de l'Outardes (Canada)	Série de trois réservoirs achevés en 1969	Hydroélectricité	Proposition d'une méthode de reconstruction et comparaison de différentes méthodes.	Régression multiple, ration des superficies, maintien de la variance et filtre de Kalman	
De Girolamo et al. (2015)	Rivière Celone (Sud de l'Italie)	Réservoirs, prélèvements (irrigation, puits) et déversements	Alimentation en eau potable	Evaluer les altérations hydrologiques d'une rivière.	SWAT, Soil and Water Assessment Tool (modèle à base physique, semi-distribué, Δt : journalier)	Reconstruction de série de débits naturels.
Mittal et al. (2015)	Bassin de la rivière Kangsabati (centre de l'Inde), branche du Gange, 5796 km ²	Barrages - réservoirs	Irrigation, Protection en cas de crue	Evaluer les altérations hydrologiques d'une rivière causée par la construction d'un barrage et les changements climatiques.	SWAT	Reconstruction de série de débits naturels.

Annexe 3 : Caractéristiques des lacs-réservoirs du bassin de la Seine.

Tableau 4 : Caractéristiques des lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine.

Lac-réservoir	Pannecièrre (Yonne)	Seine	Aube	Marne
Date de mise en service	1949	1966	1990	1974
Superficie de l'ouvrage [km ²]	5.2	23	23.2	48
Capacité [hm ³]	80	208	170	349
Capacité [mm rapportée à la surface du lac réservoir]	15 385	9 043	7 328	7 270
Superficie du bassin versant contrôlée (km ²)	220	2 380	1 650	2 900
Débit maximum de soutien en étiage (m ³ /s)	14	35	35	50

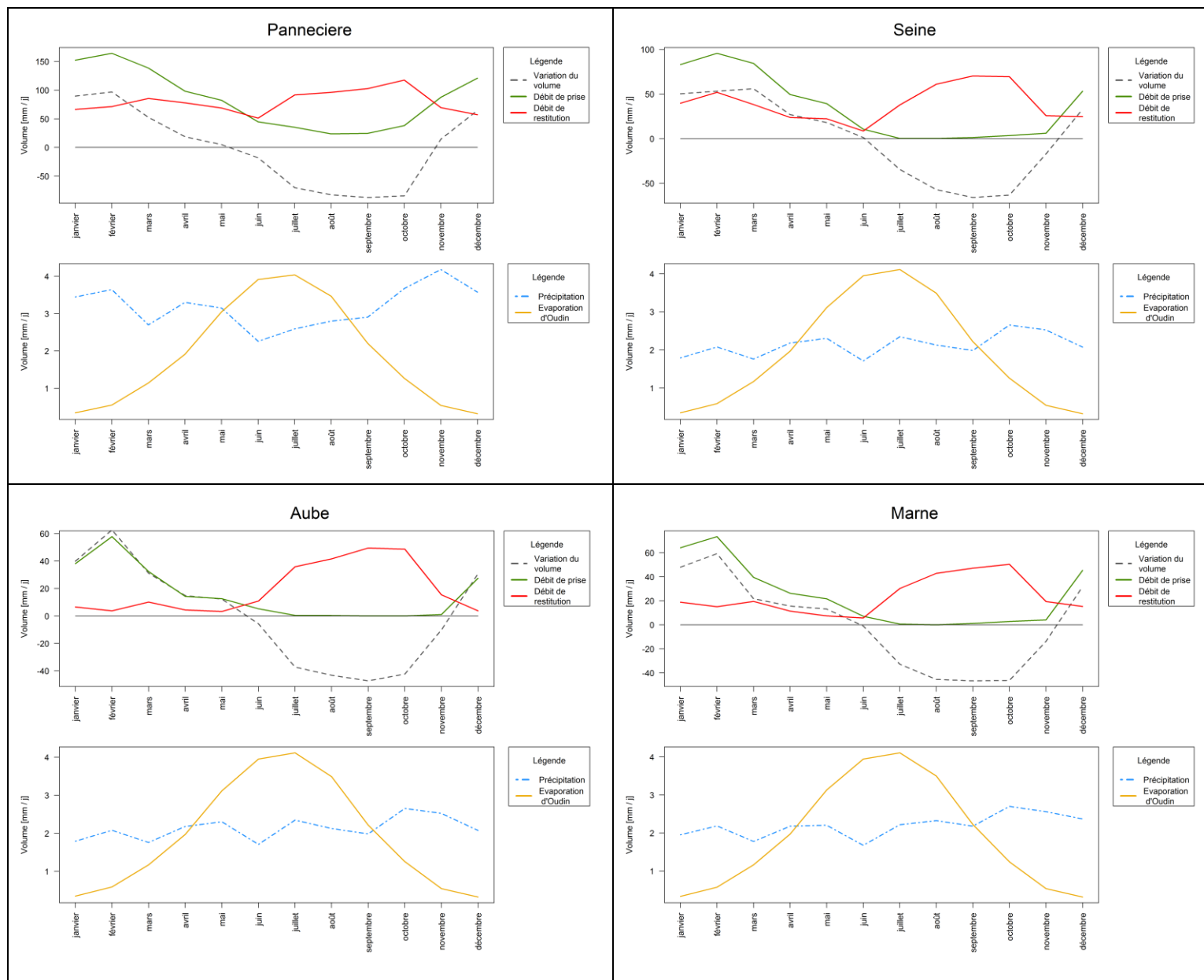


Figure 32 : Quantité moyenne journalière d'eau mise en jeu au niveau des différents lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).

Annexe 4 : Résultats des modèles GR sur le bassin amont de la Seine.

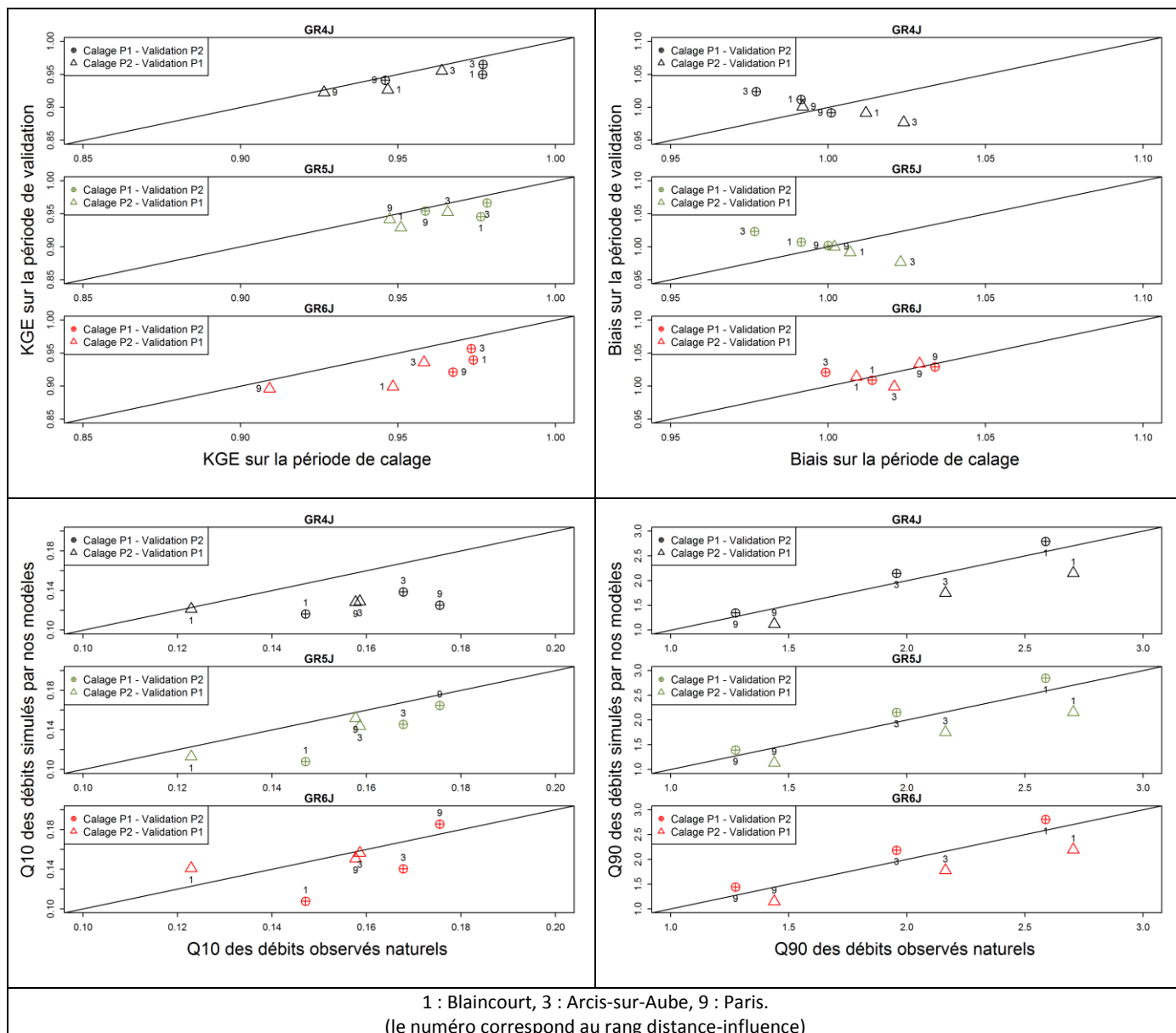


Figure 33 : Comparaison des débits naturels simulés par les modèles GR4J, GR5J et GR6J par rapport aux débits observés naturels de la Banque HYDRO sur l'Aube.

Annexe 5 : Résultats des modèles GR incluant les lacs-réservoirs sur le bassin amont de la Seine.

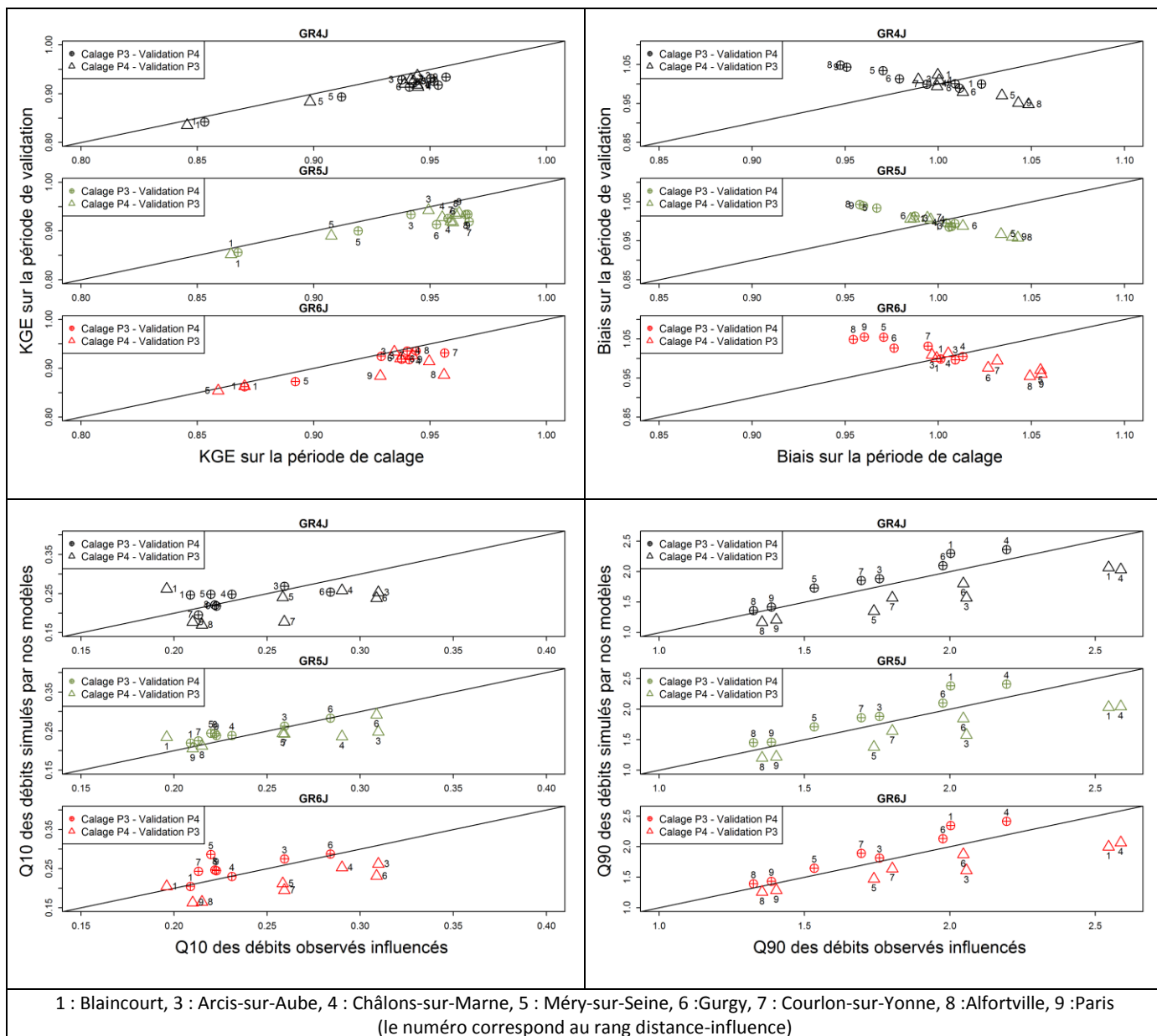


Figure 34 : Comparaison des débits influencés simulés par les modèles GR4J, GR5J et GR6J incluant les lacs-réservoirs rapport aux débits observés influencés de la Banque HYDRO.

Annexe 6 : Forces et faiblesses de la méthode de bilan sur ouvrage.

A. Evaporation et évapotranspiration

❖ Evaporation de Sill

La formule de Sill fait partie des méthodes d'estimation de l'évaporation basées sur le bilan de transfert de masse. Les formules composant ce groupe dérivent de la formule de Dalton (1802):

$$EVP = f(u) \cdot (e_s - e_a) \quad \text{Équation 11}$$

où l'évaporation EVP [mm] est calculée selon $f(u)$, une fonction du vent u , e_s [kPa], la pression de vapeur saturante à la température de l'eau, et e_a [kPa], la pression de vapeur actuelle à la température de l'air.

La formule de Sill, prenant en compte les mouvements de convection, se présente sous la forme suivante :

$$EVP = 1.15 \cdot 10^{-8} \cdot c_d \cdot u \cdot (1 + a_3 \cdot c_r) \cdot (e_s - e_a) \quad \text{Équation 12}$$

Avec : $a_3 = 0.75 \cdot c_r$ si $c_r \leq 1.37$ $a_3 = 1$ si $c_r \geq 1.37$

$$c_r = \frac{0.0017 \cdot (T_s - T_a)^{1/3}}{c_d \cdot u} \quad \text{si } T_s \geq T_a \quad c_r = 0 \quad \text{si } T_s < T_a$$

où c_d [-] correspond au coefficient de traînée, c_r [-] au ratio de convection, T_s [°C] à la température de surface du lac et T_a [°C] à la température de l'air.

❖ Evapotranspiration d'Oudin

L'évapotranspiration d'Oudin fait partie des méthodes basées sur le rayonnement. Elle se présente sous la forme :

$$ETP = \frac{Re}{\lambda} \cdot \frac{T_a + 5}{100} \quad \text{Équation 13}$$

où l'évapotranspiration, ETP [mm/j], est calculée grâce au rayonnement solaire global, Re [MJ/m²/j], à la température moyenne de l'air, T_a [°C] et au flux de chaleur latente, λ [MJ/kg].

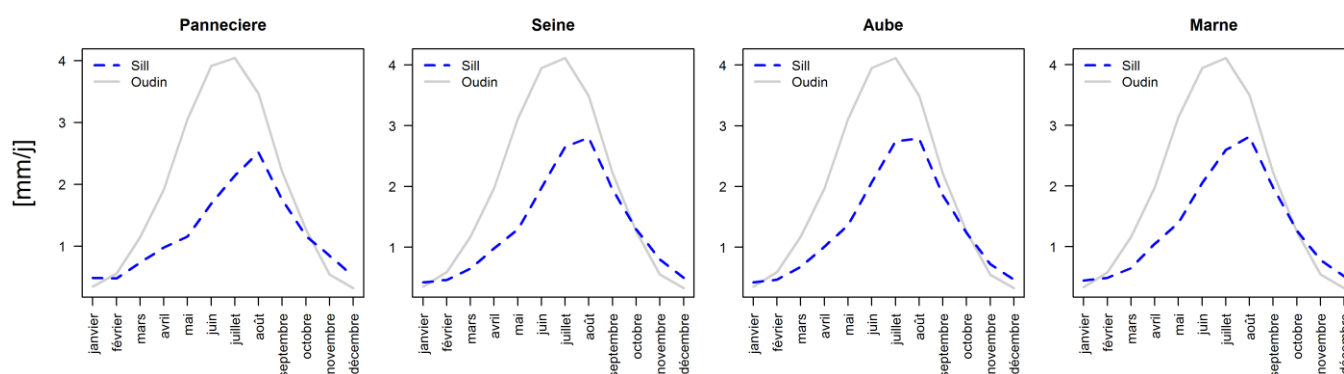


Figure 35 : Régime journalier de l'évaporation de Sill et de l'évapotranspiration d'Oudin sur les lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine (période : [P3P4]).

❖ Evaporation réelle du bac Colorado

Le bac Colorado, de forme parallélépipédique, est un bac d'évaporation où il est possible d'estimer directement l'évaporation réelle grâce aux variations de hauteurs d'eau. Il est à noter que l'évaporation d'un bac Colorado est toujours plus élevée que l'évaporation réelle d'un lac, du fait que la température au-dessus des lacs est généralement plus basse qu'au-dessus du bac. Ainsi nous

pouvons voir que la Figure 36 que l'évaporation réelle du bac Colorado est effectivement supérieure à l'évaporation de Sill mais reste cependant plus basse que l'évapotranspiration d'Oudin.

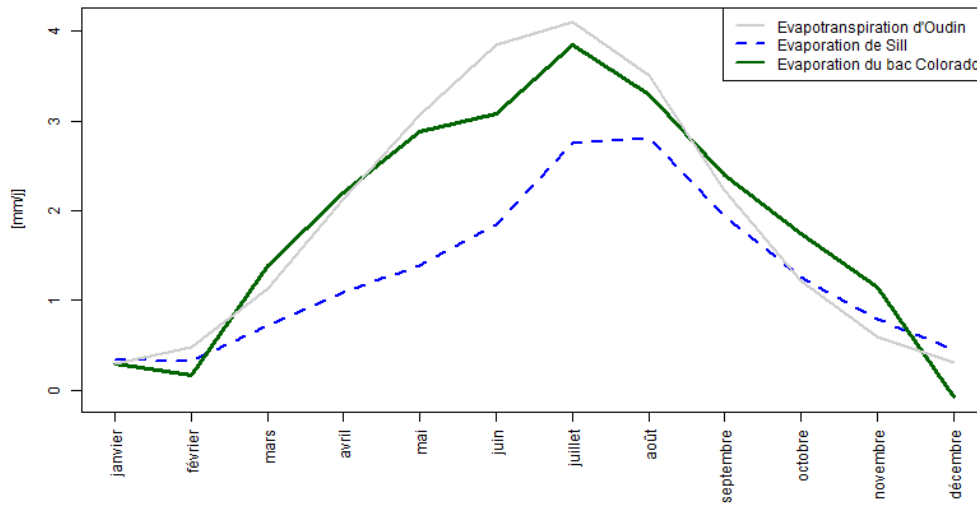


Figure 36 : Moyennes journalières de l'évapotranspiration d'Oudin, de l'évaporation de Sill et de l'évaporation issue d'un bac Colorado sur le site du lac-réservoir de la Marne (période : 2009-2013).

B. Evolution morphologique saisonnière des lacs

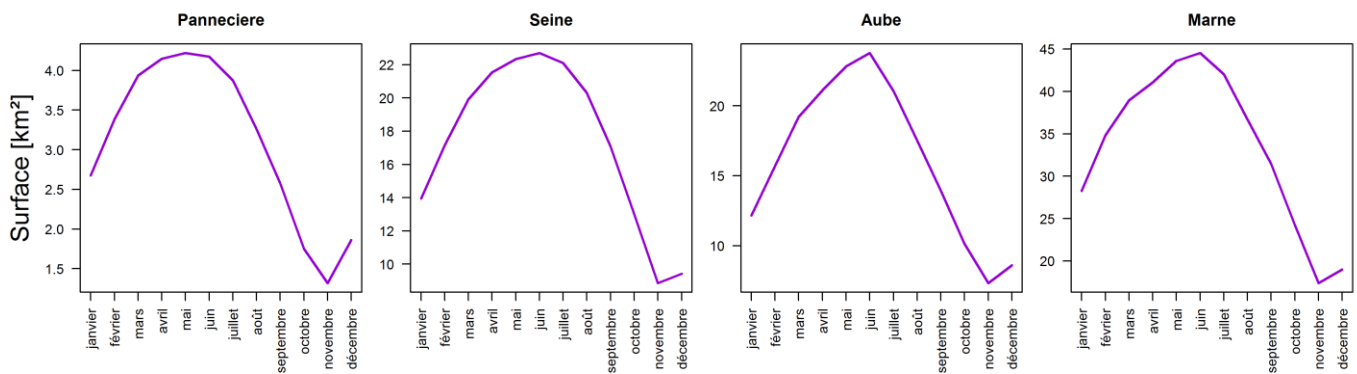


Figure 37 : Evolution mensuelle de la surface des lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine.

Sur la Figure 38, les lames d'eau correspondent à la surface maximum du réservoir considéré.

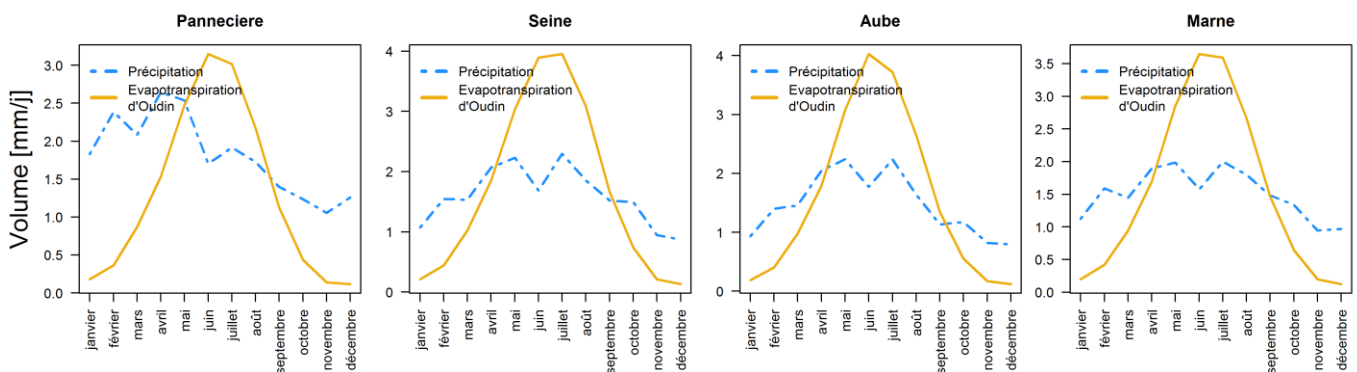
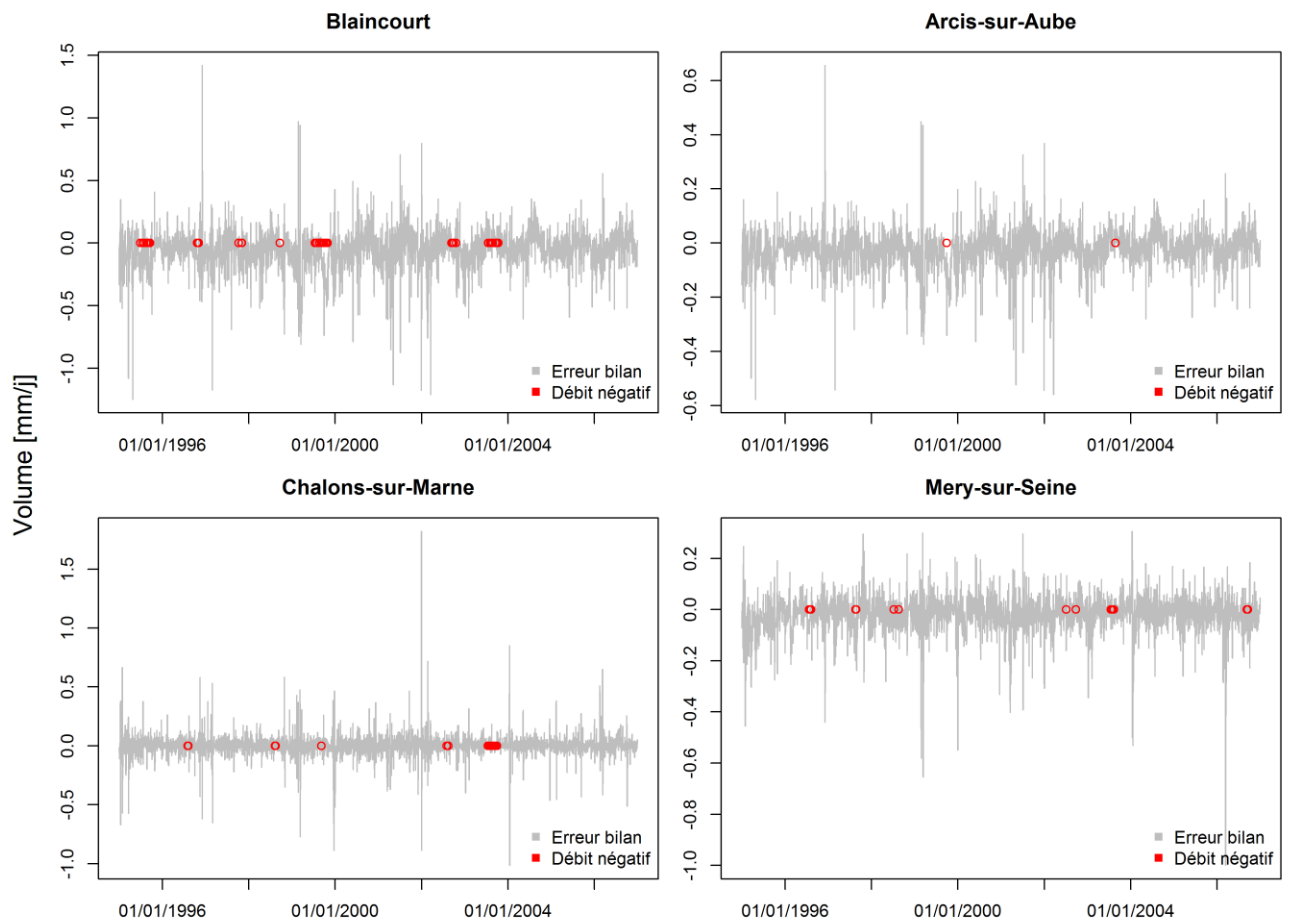


Figure 38 : Régime journalier des précipitations et de l'évapotranspiration d'Oudin des lacs-réservoirs du bassin amont de la Seine en prenant en compte leurs variations surfaciques (période : [P3P4]).

C. Débits négatifs



Débits négatif: 3.6% pour Blaincourt, 0.07% pour Arcis-sur-Aube, 1.46% pour Chalons-sur-Marne et 0.82% pour Mery-sur-Seine

Figure 39 : Débits négatifs et erreur sur le bilan sur ouvrage aux stations de Blaincourt (Aube), d'Arcis-sur-Aube, de Châlons-sur-Marne et de Méry-sur-Seine (période : [P3P4]).

Annexe 7 : Forces et faiblesses de la méthode d'extension de séries de débits naturels

A. Intervalle de confiance de nos résultats

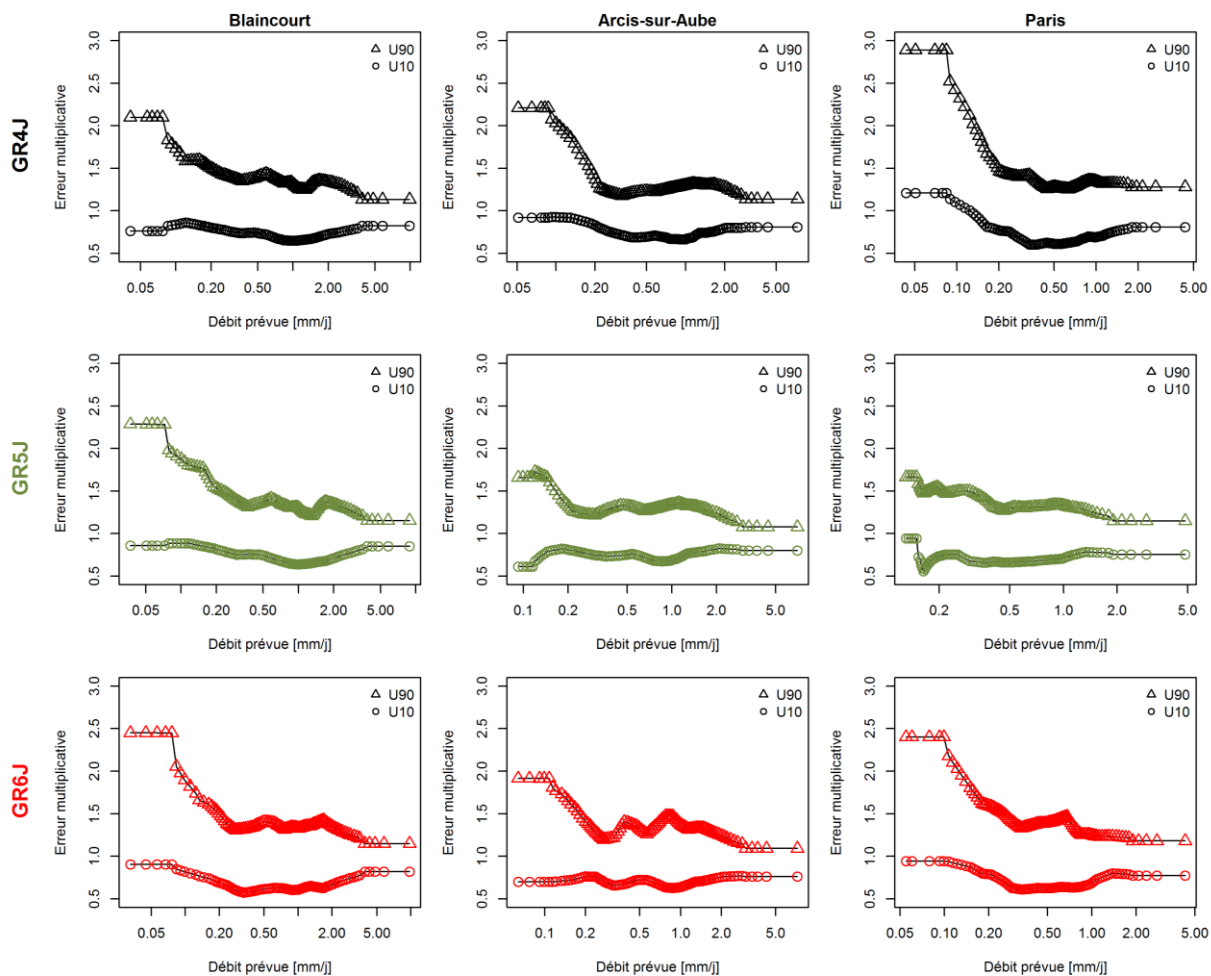
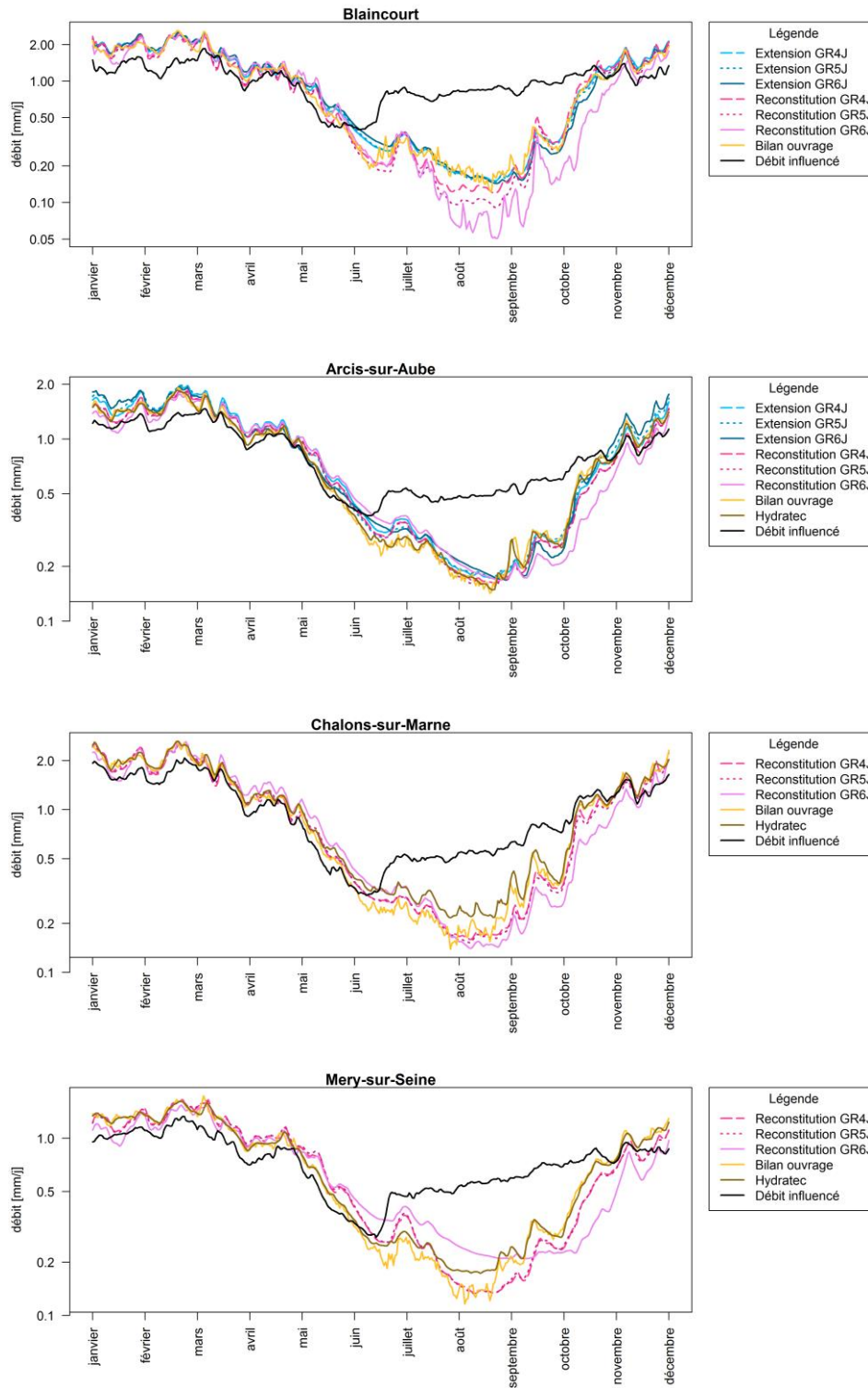


Figure 40 : Erreurs multiplicatives U10 et U90 obtenues grâce à la méthode QUOIQUE sur les stations de Blaincourt, Arcis-sur-Aube et Paris avec les modèles GR4J, GR5J et GR6J (période de référence : [P1P2]).

Annexe 8 : Régimes naturels simulés et régimes influencés de nos stations d'études sur la période [P3P4]

Les stations sont présentées selon leur rang distance-influence, de la plus influencée (Blaincourt) à la moins influencée (Paris).



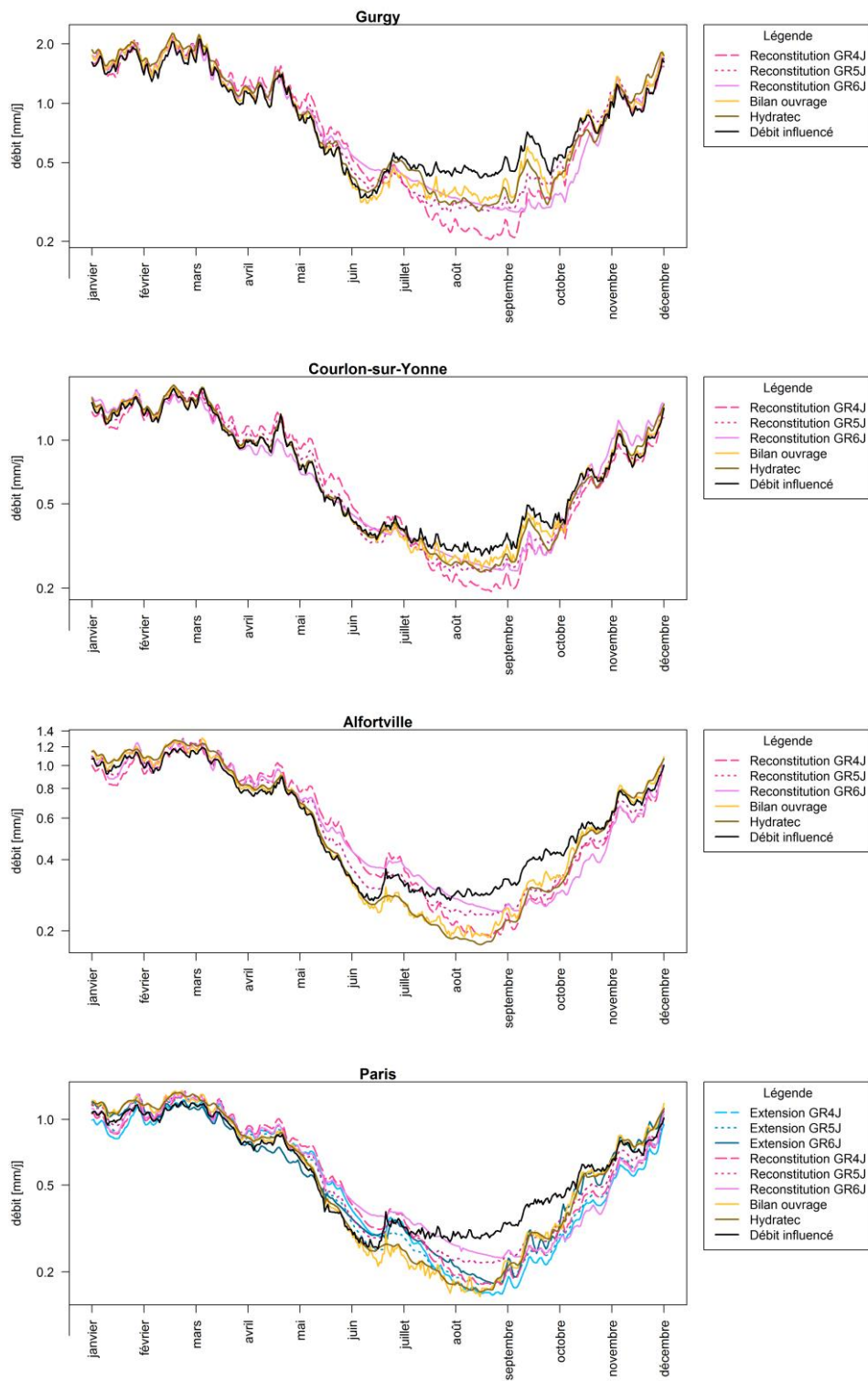


Figure 41 : Régimes interannuels naturalisés et régime influencé observé des stations amont du bassin versant de la Seine (période : [P3P4]).